Дж. В. А. ДЭММЕР, Г. М. НОРДЕНБЕРГ

КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Перевод с английского
канд. техн. наук З. В. ЕРЮХИНОЙ
под редакцией
д. т. н. проф. В. Т. РЕННЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

FIXED AND VARIABLE CAPACITORS

G. W. A. DUMMER, M. B. E., M. I. E. E.

Head of Components Research, Development and Testing at the Radar Research Establishment, Ministry of Supply

HAROLD M. NORDENBERG

Head of the Electronic Parts Unit, Bureau of Ships, Navy Department

McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC
New York Toronto London
1960

ЭС-5-3
УДК621.319.4
Д11

В книге описываются основные свойства конденсаторов постоянной и переменной емкости, приводятся данные об их стандартизации и нормализации в США и Англии и излагаются основные сведения о конденсаторах для радиоэлектроники, выпускаемых в этих странах.

Книга может представить интерес как для специалистов конденсаторного производства, так и для широкого круга инженерно-технических работников радиоэлектронной техники, имеющих дело с применением электрических конденсаторов.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Книга «Конденсаторы постоянной и переменной емкости» представляет собой результат совместного труда Дж. В. А. Дэммера, возглавляющего работу по исследованию, разработке и испытанию радиодеталей в Исследовательской радиолокационной организации Англии, и Г. М. Норденберга, который возглавляет отдел электронных деталей Бюро судов морского министерства США. Это наиболее обширная монография по электрическим конденсаторам на английском языке после известной книги Ф. Р. Корсея «Электрические конденсаторы».

Книга Дэммера и Норденберга в известной степени отражает объединенный опыт англо-американского конденсаторостроения и современный уровень этой отрасли техники, хотя по технологическим вопросам в ней сообщаются весьма скромные сведения. Более подробно описаны конструкции и электрические свойства американских и английских конденсаторов.

Библиография, приводимая в этой книге, довольно обширна и охватывает большой период, начиная с 1920 г. В ней указаны в основном работы, опубликованные на английском языке, и в меньшей степени немецкие, французские и итальянские источники. Ссылки на книги, изданные на русском языке, носят лишь случайный характер и не могут дать правильного представления о нашей обширной литературе по рассматриваемому вопросу.

Можно надеяться, что работники советского конденсаторостроения с интересом ознакомятся с книгой Дж. В. А. Дэммера и Г. М. Норденберга. Наличие в ней общих сведений о свойствах электрических конденсаторов и стандартизации их в США и Англии, о методах их испытания делает ее полезной и для лиц, сталкивающихся с применением конденсаторов в различных изделиях и устройствах радиоэлектронной техники.

В. Ренне

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

Электронные детали — это те элементы, из которых строится все электронное оборудование, и, конечно, надежность сложной современной электронной установки определяется надежностью ее наиболее слабой части. Поэтому конструкторам и потребителям необходимо наилучшим образом знать характеристики деталей электронного оборудования. Эта книга, сообщая основные сведения о важнейших характеристиках той или иной детали, имеет целью помочь потребителю выбрать наилучшую деталь для частного случая ее применения.

В США книга такого рода, специально посвященная конденсаторам постоянной и переменной емкости, публикуется в первый раз. Хотя в ней упоминается о некоторых деталях европейского производства, в основном рассматриваются американские детали.

Поскольку различные типы деталей насчитываются теперь тысячами, в книге такого рода невозможно рассмотреть каждый индивидуальный тип электронной детали. Поэтому в качестве представителей высококачественных деталей выбраны типы конденсаторов, предназначенные для военной аппаратуры, и лишь некоторые коммерческие типы. Кроме того, военные типы стандартизованы, а потому число их меньше. Коммерческие детали обычно не рассчитаны на столь жесткие условия эксплуатации, но в своей основе они схожи с военными.

Разработка электронных деталей идет сравнительно медленно, и часто проходит несколько лет между первыми результатами исследовательской работы и началом производства детали. Возможны небольшие модификации и изменения типов, о чем производители деталей обычно охотно представляют информацию.

Так как по электронным деталям, по-видимому, нет специальной библиографии, авторы собрали некоторое число ссылок на литературу по конденсаторам постоянной и переменной емкости, рассматривая эти ссылки как ядро будущей библиографии.

Мы надеемся, что эта книга заполнит пробел в существующей технической литературе и поможет промышленности в разработке и производстве лучшего электронного оборудования.

Дж. В. А. Дэммер, Г. М. Норденберг

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ РАДИОДЕТАЛЕЙ

Период развития электротехники и, в частности, недавно возникшей электроники относительно мал. Хотя статическое электричество было открыто в Греции еще в 600 г. до нашей эры, но первый простейший конденсатор появился только в 1745 г., когда в Германии были обнаружены свойства накопления заряда в стеклянной банке. Вместе с тем первыми радиодеталями (сопротивление, индуктивность и емкость) можно считать только составные части схемы Герца, разработанной в 1887 г. *

Открытие Фарадеем в 1850 г. у сульфида серебра высокого по абсолютной величине отрицательного температурного коэффициента явилось предвидением современного термистора. В 1880 г. в Германии был разработан алюминиевый электролитический конденсатор. Хотя первое непроволочное сопротивление было изготовлено в 1885 г., первой индуктивностью радиотипа служила сама петля Герца.

В 1904 г. была изобретена первая двухэлектродная лампа — диод, а в 1907 г. — триод. Эти лампы использовали в передатчиках и приемниках для радиотелеграфирования.

Первая мировая война 1914—1918 гг. ускорила развитие радиосвязи. Оборудование радиосвязи потребовало

* Началом применения радиодеталей следует считать изобретение радио А. С. Поповым. (*Прим. ред.*)

производства большего количества электронных ламп. Поэтому и радиодетали начинают приобретать форму, приближающуюся к современной.

После первой мировой войны, в мирное время, радио используют для связи и передачи широковещательных программ.

Начало развития производства радиодеталей относится к 1920 г., когда электронная промышленность стала специализироваться по отдельным отраслям. В это время появились и радиолюбители, которые конструировали собственные приемники.

Сопротивления использовались в больших количествах в цепях утечки, в анодных контурах и других частях радиосхем. Эти сопротивления выпускались на основе углеродных композиций различного состава, спрессованных в цилиндрики, армированные колпачками или снабженные проволочными радиальными выводами. Бумажные конденсаторы выпускались преимущественно цилиндрического типа в пропитанных воском картонных трубках с торцами, залитыми воском или другим подобным ему материалом. Широко применялись слюдяные конденсаторы открытой конструкции, а позднее — опрессованные пластмассой. Первые электролитические конденсаторы изготовляли жидкостного типа в цилиндрических металлических корпусах.

После 1925 г. любительское изготовлéние радиоприемников сокращается, а промышленное производство их и соответственно производство радиодеталей улучшается и возрастает настолько, что к 1940 г. в США находится в эксплуатации уже около 52 миллионов радиоприемников. Сначала стандарты на радиодетали были рассчитаны только для выпуска широковещательной аппаратуры. Климатической защиты не требовалось, а самокомпенсирующие свойства электронной лампы позволяли использовать широкие допуски на электрические свойства и мириться с их недостаточной стабильностью. Если не считать отдельных случаев применения деталей в телефонии, измерительной технике и военном деле, то в этот период от производства радиодеталей высокого качества не требовалось.

В конце 20-х годов Военно-морским министерством было введено понятие о типовой оценке, предшествующей заключению контракта. Такая оценка позволяла улучшить качество выпускаемой продукции, удлинить срок службы

радиодеталей и создавала основу для дальнейшей стандартизации и спецификации.

Однако только вторая мировая война с ее беспрецедентными потребностями в сложном, но надежном оружии привела к быстрому производству большого количества радиодеталей. Использование радиолокационного оборудования также увеличило потребность в радиодеталях, в том числе в радиодеталях новых типов. Необходимость увеличения производства, требования взаимозаменяемости и повышения качества, а также недостаток материалов обусловили междуведомственную стандартизацию радиодеталей.

Летом 1942 г., чтобы облегчить изготовление аппаратуры, идущей на военные нужды, директор отдела радио- и радарных установок Министерства военного производства разработал программу стандартизации. Эту программу должна была выполнять Американская ассоциация стандартов с учетом процедуры выпуска военных стандартов. В результате были организованы два комитета военных стандартов: Комитет по радиоаппаратуре и Комитет по электрическим приборам. Под руководством этих комитетов для разработки отдельных стандартов были созданы рабочие группы. В эти группы включали специалистов из армии, радиопромышленности и с производств радиодеталей. Рабочие группы подготовили свыше двадцати военных стандартов, охватывающих такие детали, как сопротивления, конденсаторы, изоляторы, кристаллы, выключатели и мотор-генераторы. Эти стандарты установили требования к поведению в эксплуатации, электрические нагрузки, физические характеристики, методы испытаний и систему идентификации. Позднее на их основе под руководством Бюро спецификаций армии и флота (ANJSB) была создана значительно более обширная программа работ, которую два министерства выдвинули в 1944 г. для согласования своих требований. Такие стандарты стали известны как Совместные спецификации армии и военно-морского флота (JAN). В результате правительственной реорганизации ANJSB претерпело некоторое изменение как в структуре, так и в названии. Его эквивалент существует теперь под названием Центра снабжения вооруженных сил (AFSSC).

В мае 1946 г. министерствами армии и военно-морского флота для координации и выполнения административных функций, таких, как качественное одобрение выпуска согласованных спецификаций, было создано Агентство стан-

дартов по электронной и электроаппаратуре для армии и военно-морского флота (ANEESA).

В 1947 г. военно-воздушные силы были подчинены самостоятельному министерству, и спецификации JAN были заменены военной (MIL) серией спецификаций, учитывающих особые требования воздушного флота. Вместо ANEESA было создано Агентство электростандартов вооруженных сил (ASESA), обслуживающее теперь три военных министерства.

Опыт военных действий, особенно в районе Тихого океана, показал недостаточную удовлетворительность радиодеталей, которые применялись в системах повышенной сложности. Для того чтобы обеспечить требования, предъявляемые к все усложняющемуся оборудованию, надо было составить координированную программу научных исследований и разработок. В июне 1946 г. были изданы такие программы, согласованные между Военным министерством и Министерством военно-морского флота. В 1947 г. реализация этих программ была поручена Совету исследований и разработок (RDB), ответственному перед министром обороны за состояние всех вопросов военных исследований.

Под руководством этого Совета был создан Комитет по электронике с отделом радиодеталей и вспомогательными подотделами по определенным видам этих изделий для стимулирования, планирования и координации исследований и разработки радиодеталей. После реорганизации Министерства обороны в 1953 г. функции RDB вошли в компетенцию помощника министра обороны по исследованию и разработкам. Комитет по электронике сохранился под руководством помощника министра обороны по исследованиям и разработкам (позднее — по исследованиям и технике). Отдел радиодеталей с его подотделами был заменен Совещательной группой по деталям электроники (AGEP) с восемью рабочими группами: по конденсаторам, катушкам индуктивности и трансформаторам, электромеханическим устройствам, устройствам контроля частоты, узлам и технике сборки узлов, сопротивлениям, электротехническим материалам и передающим линиям. Сотрудники этих групп были переведены из военных ведомств и промышленности.

AGEP ответственна за координацию, планирование, суммирование, руководство и рекомендацию уровня бюд-

жетных расходов по всем научным исследованиям и договорам на разработку радиодеталей. С целью облегчения работы Совещательной группы в Филадельфии при Пенсильванском университете по соглашению с тремя министерствами был создан постоянный секретариат. Согласованные научные исследования позволили государственным служащим и работникам промышленности за последние 15 лет внести многочисленные усовершенствования в конструкцию радиодеталей.

Были разработаны миниатюрные и высоконадежные герметизированные бумажные конденсаторы в металлических цилиндрических корпусах, керамические материалы с высокой диэлектрической проницаемостью и изготовленные из них дисковые и трубчатые конденсаторы, танталовые электролитические конденсаторы (как с жидким, так и с твердым электролитом), стеклянные и стеклоэмалевые конденсаторы с электрическими свойствами, эквивалентными слюдяным, металлобумажные конденсаторы и конденсаторы с комбинированным диэлектриком из бумаги и пленки майлар, мощные проволочные остеклованные сопротивления, герметизированные прецизионные проволочные сопротивления, высокостабильные герметизированные металлопленочные и углеродистые сопротивления.

Затем появились трансформаторы, способные работать в течение 2000 *ч* при температуре окружающей среды 200° С; трансформаторы, заполненные фторированными газообразными или жидкими соединениями, для создания мощных импульсов тока и высоковольтных применений, способные работать в течение 10 000 *ч* при температуре окружающей среды 125° С; трансформаторы, залитые смолой и герметизированные кремнийорганической резиной, изготовленные с использованием различных материалов и технологии, и многие другие детали, такие, как герметизированные реле, измерительные приборы и выключатели, рассчитанные на те же условия работы. Технология предусматривала массовый выпуск продукции. Каждая из этих разработок содействовала улучшению деталей, крайне необходимых в сложном электронном оборудовании для военных целей. В итоге современные радиодетали уже мало похожи на своих более ранних предшественников. Они меньше по размерам, легче и способны работать в широком интервале температур при неблагоприятных климатических условиях. Тем не менее

сейчас требуются еще более жесткие стандарты, предусматривающие, в частности, способность к работе при еще более высокой температуре, еще бо́льшую стабильность при изменении условий окружающей среды, бо́льшую надежность и еще меньшие удельные объемы. Поэтому нет сомнения в том, что научные исследования и работы по усовершенствованию будут продолжаться с целью дальнейшего улучшения характеристик радиодеталей, известных в настоящее время.

РАЗДЕЛЕНИЕ РАДИОДЕТАЛЕЙ НА КАТЕГОРИИ ПО ИХ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

До и во время второй мировой войны не было общей спецификации для радиодеталей, учитывающей условия окружающей среды. Некоторые из ранних военных спецификаций, а позднее военные стандарты начали включать климатические требования для отдельных деталей. Распространение войны на территории с различным климатом и тяжелыми условиями работы аппаратуры привело к разработке различных методов климатических испытаний радиодеталей. Позднее эти испытания были включены в спецификации JAN и MIL для радиодеталей. В дальнейшем на все типы климатических и электрических испытаний был издан общий стандарт под названием «Военный стандарт 202», на который при необходимости даются ссылки в соответствующих разделах спецификаций на отдельные радиодетали.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОДЕТАЛЕЙ

Спецификация и требования к радиодеталям изменяются в зависимости от условий их применения. В табл. 1-1 приведены основные классы радиодеталей. В качестве документа для текущих и будущих исследований и разработок, а также для дальнейшей стандартизации Центр снабжения вооруженных сил (AFSSC) недавно выпустил военный стандарт 446 под названием «Климатические требования к радиодеталям». Табл. 1-2 показывает климатические характеристики и группы, перечисленные в этом стандарте.

Таблица 1-1

Классы радиодеталей

Класс детали	Применение	Требования
Коммерческий	Радио, телевидение	Цена должна быть конкурентноспособной. Широкая доступность и долгий срок службы. Малые габариты. Герметизации не требуется.
Профессиональный	Промышленность, электроника, связь, вычислительные устройства	Цена может быть выше. Существенны высокая точность и постоянство электрических характеристик. Высокая надежность и длительный срок службы (минимум 40 000 *ч*). Малые габариты не требуются.
Военный	а) Наземная и военно-морская связь, радиолокаторы, испытательное оборудование, вычислительные устройства	Высокая надежность. Пригодность для работы в широком диапазоне климатических условий с минимальным сроком службы не менее 10 000 *ч*.
	б) Воздушная связь, радиолокаторы, вычислительные устройства	Высокая надежность. Пригодность к работе в суровых и разнообразных климатических условиях, малый вес, миниатюрность или субминиатюрность, срок службы не менее 2000 *ч*.
	в) Управляемые снаряды	Высокая надежность. Суровые условия эксплуатации. Пригодность для работы в широком диапазоне климатических условий, миниатюрность или субминиатюрность, совместимость с заливочными смолами в случае необходимости такой заливки. Широкий интервал рабочих температур. Короткий срок службы или испытания (500 *ч*), но большие сроки хранения — до 5 лет.
Военный	Транзисторная техника	Высокая надежность. Широкая климатоустойчивость и способность работать в широком интервале температур с минимальным сроком службы 10 000 *ч*. По размерам должны быть сравнимы с транзисторами.
Коммерческий	Транзисторная техника	Цена должна быть конкурентноспособной. Широкая доступность. По размерам должны быть сравнимы с транзисторами.

Климатические требова

Воздействующий фактор	Группа I	Группа II	Группа III
Температура, °C:			
рабочая	От −55 до +55	От −65 до +85	От −65 до +125
хранения	От −65 до +71	От −65 до +85	От −65 до +85
тепловой удар	Не применим	От −65 до +85	От −65 до +125
Давление, *мм рт. ст.*:			
рабочее	522	33,5	522
высота, *м*	3048	21400	3048
нерабочее	86,3	Не применимо	86,3
высота, *м*	15250	—	15250
Влажность	100% относительная влажность		
Механическая вибрация:			
циклы в секунду	10—55	10—2000	10—55
ускорение, *g*	Не применимо	10	Не применимо
Удар:			
ускорение, *g*	50	50	50
время, *мсек*	6	11 ± 1	11 ± 1
Воздушная вибрация:			
циклы в секунду	Не применимы		
децибелы выше $2 \cdot 10^{-4}$ *дин/см²*	Не применимы		
Атмосфера продуктов взрыва	Детали должны быть испытаны в		
Ядерная радиация (реактор):			
Интенсивность потока быстрых нейтронов:			
нейтрон/см² · сек	—	—	—
время, *ч*	—	—	—
Интенсивность потока гамма-фотонов:			
фотон/см² · сек	—	—	—
время, *ч*	—	—	—
Тепловые нейтроны	—	—	—

* Тепловые нейтроны не вносятся в перечень требований, но так то эта составляющая должна быть измерена и описана при всех испы

ния к радиодеталям

Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII
От — 65 до + 125	От — 65 до + 200	От — 65 до + 200	От — 65 до + 350	От — 65 до + 500
От — 65 до + 85	От — 65 до + 85	От — 65 до + 85	От — 65 до + 85	От — 65 до + 85
От — 65 до + 125	От — 65 до + 200	От — 65 до + 200	От — 65 до + 350	От — 65 до + 500
8,3	8,3	1,0	1,0	1,0
30480	30480	45750	45750	45750
		Не применимо		
—	—	—	—	—
с конденсацией влаги на деталях				
10—2000	10—2000	10—2000	10 —2000	10—3000
10	15	15	20	40
50	50	50	50	50
11 ± 1	11 ± 1	11 ± 1	11 ± 1	11 ± 1
150—9600	150—9600	150—9600	150 —9600	150—9600
165	165	165	165	165
соответствии с п. 1 спецификации MIL-E-5272				
Не применяется		10^{10}	Не применяется	10^{10}
То же		1000	То же	1000
Не применяется		10^{11}	Не применяется	10^{11}
То же		1000	То же	1000
То же		*	То же	*

как все потоки нейтронов имеют некоторую тепловую составляющую, таниях.

Воздействующий фактор	Группа I	Группа II	Группа III
Ядерная радиация (импульс):			
Интенсивность потока быстрых нейтронов:			
нейтрон/см² · сек	—	—	—
время, *мксек*	—	—	—
Интенсивность потока гамма-лучей:			
рентген/сек	—	—	—
время, *мксек*	—	—	—
Песок и пыль		Применимы только для	
Соляная атмосфера, *ч*	96	96	96
Способность к воспламенению .		Не должны поддер	
Сопротивление образованию плесени		Не должны служить	
Время жизни:			
при работе, *ч*	30000	30000	30000
при хранении *, *лет* . . .	5	5	5

* Для дополнительных деталей, указанных министерством оборо-
стандарт 446).

Климатические группы

Каждая из перечисленных ниже групп включает радиодетали, которые соответствуют определенным климатическим требованиям, предъявляемым тремя военными департаментами.

Группа I. Радиодетали, которые подвергаются воздействию условий, не более суровых, чем обычные климатические условия. Для этой группы характерны изделия, используемые в портативном ручном оборудовании средств связи, радиочастотные и другие кабели, измерительные приборы, телефонные шнуры, волноводы и штепсельные разъемы.

Группа II. Радиодетали прецизионного типа, используемые в целях настройки или контроля частоты, где весьма важна электрическая стабильность.

Группа III. Радиодетали, предназначенные для общего использования в морском и наземном электронном оборудовании.

Группа IV. Радиодетали для электронного оборудования, устанавливаемого на высотных самолетах и ракетах типа воздух — земля и воздух — воздух.

Окончание табл. 1-2

Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII
10^{17}	Не применяется	10^{17}	Не применяется	
10^{17}	То же	10^{17}	То же	
10^{8}	То же	10^{8}	То же	
80	То же	80	То же	
движущихся частей *				
96	96	96	96	96
живать горения *				
питательной средой *				
2000 5	20000 5	2000 5	2000 5	10000 5

ны, — «Требования к окружающей среде для радиодеталей» (Военный

Группа V. Радиодетали для электронного оборудования высотных самолетов и специального корабельного оборудования.

Группа VI. Радиодетали для электронного оборудования атомных самолетов и баллистических ракет.

Группа VII. Радиодетали, используемые в электронном оборудовании специального применения на высотных самолетах и ракетах.

Группа VIII. Радиодетали для электронного оборудования атомного оружия.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ

ЕМКОСТЬ

Емкость создается между любыми двумя соседними проводниками. Конденсатор состоит из двух металлических пластин, разделенных диэлектриком, таким, как воздух, газ, бумага, керамика или оксидный слой. Когда между двумя металлическими пластинами прикладывается на-

пряжение, конденсатор заряжается. Величина заряда будет зависеть от напряжения. Емкость конденсатора равна отношению приобретенного заряда к приложенному напряжению:

$$C = \frac{Q}{U},$$

где C — емкость, *ф*;
Q — заряд, *к* (или *а* · *сек*);
U — напряжение, *в*.

Единица емкости — фарада (*ф*). Конденсатор имеет емкость, равную 1 *ф*, если при напряжении 1 *в* он приобретает заряд, равный 1 *к*. Эта единица слишком велика для практического применения, поэтому обычно используют микрофараду (1 *мкф* = 10^{-6} *ф*) и микромикрофараду, или пикофараду (1 *пф* = 10^{12} *ф*).

Энергия заряда запасается в виде электростатической энергии в диэлектрике и равна $\frac{CU^2}{2}$. Если энергия поглощается равномерно за время τ, то требуемая мощность

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{CU^2}{\tau},$$

где P — средняя мощность, *вт*;
τ — время, *сек*.

При переменном напряжении выражение для реактивной мощности приобретает вид:

$$P_{\sim} = 2\pi CU^2 f,$$

где f — частота, *гц*;
U — напряжение, эффективное значение, *в*.

В случае, когда к конденсатору приложено постоянное напряжение, в диэлектрике связанные электрические заряды поляризуются или смещаются из своего нормального положения равновесия. Поэтому на зарядку конденсатора затрачивается определенная работа. Эта работа выражается в джоулях (или *вт* · *сек*). Она равна запасенной потенциальной энергии:

$$I = \frac{1}{2} QU, \text{ или } \frac{1}{2} CU^2, \text{ или } \frac{Q^2}{2C},$$

где I — энергия, *дж* или *вт* · *сек*;
Q — заряд, *к* или *а* · *сек*;
N — напряжение, *в*;
C — емкость, *ф*.

Основная формула емкости двух плоских пластин, разделенных диэлектриком,

$$C=\frac{\varepsilon A\cdot 10^{12}}{4\pi d\cdot 9\cdot 10^{11}},\ \text{или}\ C=\frac{0{,}0885\,\varepsilon A}{d},$$

где C — емкость, *пф*;

ε — диэлектрическая проницаемость;

A — площадь одной пластины, *см*^{2};

d — расстояние между пластинами, *см*.

Если число пластин больше одной, то числители первой и второй формул умножаются на (N — 1), где N — число пластин.

Вследствие краевого эффекта точность этой формулы не вполне удовлетворительна. Фактическая емкость несколько выше расчетной, поэтому размеры пластин необходимо скорректировать: в случае прямых краев к сторонам пластины добавляется по 0,44 d, а в случае закругленных краев — по 0,11 d.

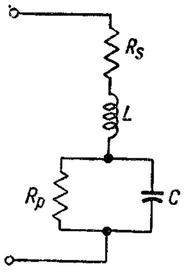


Рис. 2-1. Схема, эквивалентная конденсатору.

C — емкость; L — индуктивность выводов и обкладок; R_p — сопротивление, эквивалентное потерям в диэлектрике и материале корпуса; R_s — сопротивление, эквивалентное потерям в выводах, обкладках и переходных контактах.

Конденсатор может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 2-1), где C — емкость конденсатора; R_s — сопротивление выводов, пластин и контактов; R_p — сопротивление, обусловленное диэлектриком и материалом корпуса; L — индуктивность выводов и пластин конденсатора.

Поведение конденсатора при различных частотах описано в этой главе ниже. Необходимо заметить, что емкость никогда не остается неизменной, за исключением некоторых определенных условий. Она изменяется в зависимости от температуры, частоты, срока службы и т. д. Номинальное значение емкости, указанное в маркировке конденсатора, строго говоря, соответствует только комнатной температуре и низкой частоте.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Диэлектрики, используемые в конденсаторостроении, могут быть разделены на следующие пять основных классов:

1) слюда, стекло, керамика с низкими потерями и т. п.; используются в конденсаторах с емкостью от нескольких единиц до нескольких сотен пикофарад;

2) керамика с высокой диэлектрической проницаемостью; используется при емкостях от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч пикофарад;

3) бумага и металлизированная бумага; используются в конденсаторах с емкостью от нескольких тысяч пикофарад до нескольких микрофарад;

4) оксидные пленки (в электролитах); используются при емкостях от единиц до многих микрофарад;

5) пленочные диэлектрики, такие, как полистирол, полиэтилентерефталат (майлар), политетрафторэтилен (тефлон); предел использования — от сотен пикофарад до нескольких микрофарад.

Многие факторы влияют на такие свойства конденсаторных диэлектриков, как диэлектрическая проницаемость, угол потерь, ток утечки, диэлектрическая абсорбция, электрическая прочность, допускаемая температура; этот вопрос кратко рассматривается ниже.

Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость материала, используемого в качестве диэлектрика, равна отношению емкости конденсатора, в котором диэлектриком служит данный материал, к емкости того же конденсатора с вакуумом в качестве диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость сухого воздуха приблизительно равна единице. Конденсатор с твердым или жидким диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого выше диэлектрической проницаемости воздуха или вакуума, может запасать в ε раз больше энергии при равном напряжении, поданном на пластины. Приводим следующие величины диэлектрической проницаемости ε некоторых типичных конденсаторных диэлектриков при температуре 25° С:

Вакуум	1
Сухой воздух	1,00059
Полистирол	2,5
Политетрафторэтилен (тефлон)	2
Полиэтилентерефталат (майлар)	3
Пропитанная бумага	4—6
Слюда	6,8
Окись алюминия	7
Окись тантала	25
Керамика (титанат магния и пр.)	До 20
Керамика (титанатная)	80—100
Керамика (с высокой ε)	1000 и выше

Диэлектрики могут быть разбиты на две основные группы: полярные и неполярные материалы. В полярных материалах внутри молекулярной структуры существует постоянное неравновесие электрических зарядов. Диполи представляют собой молекулы, в которых центры действия положительных и отрицательных зарядов находятся на некоторых расстояниях друг от друга. В условиях переменного электрического поля, если частота не слишком высока, диполи самоориентируются. Переориентация диполей вызывает при некоторых значениях частоты и температуры большие потери.

В неполярных материалах электрические заряды внутри молекулярной структуры уравновешены. По этой причине неполярные материалы не имеют острого максимума потерь при изменении частоты и температуры. Поливинилхлорид может служить характерным представителем полярных материалов. Диэлектрическая проницаемость поливинилхлорида, равная 10 при низких частотах, снижается до 3—4 при частоте в несколько мегагерц.

Полистирол — типичный неполярный материал с диэлектрической проницаемостью, приблизительно равной 2,5 как при постоянном, так и при переменном напряжении при частоте до многих тысяч мегагерц.

Исключительным материалом, имеющим специальные свойства, является керамика с высокой диэлектрической проницаемостью. Высокое значение ε у этого материала сохраняется при частотах до многих тысяч мегагерц, но в то же время он обладает очень высокой индуктированной поляризацией. При некотором напряжении молекулярная структура искажается настолько, что становится чрезвычайно чувствительной к температуре, механическому давлению и приложенному напряжению. В этих условиях диэлектрическая проницаемость возрастает до очень высоких значений.

Потери в диэлектриках

Потери возникают за счет тока утечки, диэлектрической абсорбции и тому подобных явлений в зависимости от частоты рабочего напряжения. На рис. 2-2 показан характер кривой зависимости потерь от частоты для хорошего неполярного диэлектрика, а на рис. 2-3 — для полярного материала.

Изменение ε с частотой незначительно до тех пор, пока потери малы. Потери увеличиваются, когда столкновения молекул затрудняют их ориентацию в электрическом поле; при этом диэлектрическая проницаемость падает.

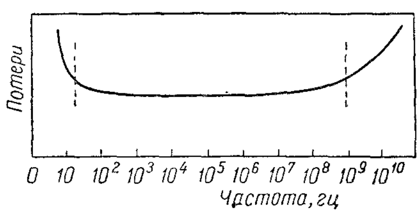


Рис. 2-2. Зависимость потерь от частоты для неполярного диэлектрика.

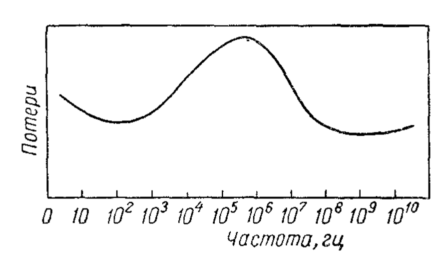


Рис. 2-3. Зависимость потерь от частоты для полярного диэлектрика.

Вязкость молекулярной структуры ограничивает частоту, при которой может происходить полная ориентация диполей. Если приложенное напряжение имеет частоту, сравнимую с этим граничным значением, то потери резко возрастают. Сопротивление, эквивалентное потерям, может быть введено как в последовательную, так и в параллельную эквивалентную схему. Это зависит от способа измерения при заданном частном значении частоты. Важным критерием является отношение:

$$\frac{\textit{Мощность, затраченная за один период}}{\textit{Мощность, запасенная за один период}}.$$

Эта величина называется коэффициентом мощности материала и для хороших диэлектриков не зависит от частоты.

Векторная диаграмма, показывающая фазовый угол и угол потерь, приведена на рис. 2-4.

Когда через конденсатор протекает переменный ток, векторы тока и напряжения сдвинуты один по отношению к другому меньше чем на 90° (угол φ на рис. 2-4). Это фазовый угол. Угол δ, дополняющий фазовый угол до 90°,

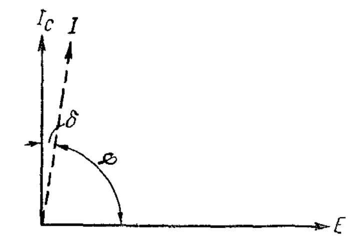


Рис. 2-4. Векторная диаграмма для конденсатора с потерями.

φ — фазовый угол; δ — угол потерь; φ + δ = 90°.

называется углом потерь. Косинус фазового угла или синус угла потерь равен коэффициенту мощности. Поэтому диэлектрические потери могут быть представлены в виде произведения: $UI \cos \varphi$ или $UI \sin \delta$. Обычно угол потерь так мал (при значении коэффициента мощности менее 10%), что можно принять $\operatorname{tg} \delta$ равным $\sin \delta$. Хотя более удобно выражать потери через $\operatorname{tg} \delta$, чем через $\cos \varphi$, так как первый легче измерить, однако для характеристики диэлектрических потерь в конденсаторах используются оба обозначения. В идеальном конденсаторе, не имеющем диэлектрических потерь, $\delta = 0$.

Коэффициент рассеивания (тангенс угла потерь)

$$\operatorname{tg} \delta = 2\pi fRC \cdot 10^{6},$$

где f — частота, *гц*;
R — эквивалентное последовательное сопротивление, *ом*;
C — емкость, *мкф*.

Коэффициент мощности может быть представлен в виде отношения потерь в диэлектрике к произведению из приложенного напряжения на ток:

$$\frac{\text{Общая потерянная (активная) мощность, вт}}{\text{Напряжение (действующее значение)} \times \text{ток (действующее значение)}}.$$

Поэтому коэффициент мощности рассчитывают по формуле

$$\cos \varphi = P_a \frac{10^{-6}}{2\pi fCU^2},$$

где P_a — активная мощность, *вт*;
f — частота, *гц*;
C — емкость, *мкф*;
U — напряжение, *в*.

Добротность конденсатора Q — величина, обратная значению $\operatorname{tg} \delta$. Она может быть представлена как отношение чисто реактивного сопротивления к эффективному сопротивлению, эквивалентному потерям.

Диэлектрическая абсорбция

Если конденсатор не обладает диэлектрической абсорбцией, то начальный заряжающий или поляризационный ток при постоянном напряжении

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{\tau}{CR}},$$

где i — ток, *а*, через время τ;
U — приложенное напряжение, *в*;
R — сопротивление, эквивалентное потерям в конденсаторе при последовательной схеме замещения, *ом*.

Поляризационный ток асимптотически снижается до нуля. Когда R мало, это происходит за малый промежуток времени, и конденсатор зарядится полностью.

Если полностью заряженный конденсатор мгновенно разрядить и оставить его выводы на некоторое время разомкнутыми, то во всех конденсаторах с твердым диэлектриком наблюдается накопление нового заряда, так как некоторая часть первоначального заряда была «поглощена» (абсорбирована) диэлектриком. Это явление называют диэлектрической абсорбцией. Оно приводит к определенному запаздыванию во времени в процессе зарядки и разряда.

Диэлектрическая абсорбция происходит вследствие того, что на смещение связанных зарядов в диэлектрике из их нормального положения требуется некоторое конечное время, так как вязкость вещества (внутреннее трение) препятствует их движению. Время установления поляризации различно для разных диэлектриков — поляризация может установиться или почти мгновенно или в течение многих часов. В одном и том же диэлектрике несколько электронов или ионов может приобрести способность к свободному перемещению после промежутка времени, исчисляемого секундами или даже сутками. Явление усложняется еще и тем, что, например, в случае бумажных пропитанных конденсаторов время установления поляризации бумаги и пропиточной массы оказывается различным.

Диэлектрическая абсорбция вызывает уменьшение емкости при повышении рабочей частоты и появление нежелательной задержки во времени в некоторых импульсных схемах или цепях, требующих быстрой смены зарядки и разряда.

Ток утечки и постоянная времени конденсаторов

При использовании конденсатора в цепи постоянного напряжения потери, обусловленные током утечки, приводят к тому, что при отключении источника энергии заряд стекает с обкладок. Время, в течение которого заряд уменьшается до $\frac{1}{e}$ (или 36,8% его начального значения), опреде-

ляется произведением $R_{is}C$, где R_{is} — сопротивление изоляции конденсатора и C — его емкость. Если R_{is} выражено в мегомах, а C — в микрофарадах, то величина $R_{is}C$ — постоянная времени — будет выражена в секундах. Она может быть также выражена в *Мом · мкф* или *ом · ф*. Конденсаторы разных типов имеют следующие характерные значения постоянной времени $R_{is}C$:

Полистирольные конденсаторы	Несколько дней
Бумажные конденсаторы	Несколько часов
Танталовые объемно-пористые электролитические конденсаторы	1 или 2 *ч*
Конденсаторы из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью	Несколько минут
Алюминиевые электролитические конденсаторы с нетравлеными анодами	Несколько секунд

Необходимо иметь в виду, что при емкостях меньше 0,1 *мкф* постоянная времени определяется в большей степени особенностями конструкции и внешнего оформления самого конденсатора, чем качеством диэлектрика. Ток утечки увеличивается с повышением температуры (примерно экспоненциально). Для хороших диэлектриков при комнатной температуре он весьма мал, и практически его трудно измерить, но при более высоких температурах ток утечки может стать заметным даже в конденсаторах с хорошим диэлектриком.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Сопротивление диэлектрика постоянному току может быть охарактеризовано поверхностным удельным сопротивлением в омах или мегомах или удельным объемным сопротивлением в *ом · см*. Поверхностное и объемное удельные сопротивления измеряются с помощью устройства, подобного изображенному на рис. 2-5.

Образец помещают в ванну со ртутью и через внутреннее и внешнее металлические кольца с ртутными электродами к двум точкам поверхности образца подают постоянное напряжение 500 *в*. В табл. 2-1 приведены типичные значения удельного поверхностного сопротивления, измеренные указанным способом (по ASTM : D257) для некоторых диэлектриков.

Удельное объемное сопротивление измеряется между верхней и нижней поверхностями образца, как показано слева на рис. 2-5. Типичные величины удельного объемного сопротивления приведены также в табл. 2-1. Следует

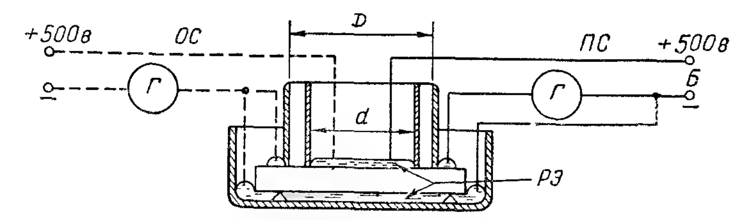


Рис. 2-5. Типичное устройство для измерения удельных сопротивлений.

ПС — измерение поверхностного сопротивления; *ОС* — измерение объемного сопротивления; *РЭ* — ртутные электроды; *Б* — батарея.

отметить, что сопротивление изоляции конденсаторов с хорошими диэлектриками (стекло, слюда и т. п.) может заметно уменьшиться при использовании для их конструктивного оформления материалов с пониженным удельным сопротивлением, таких, как фенольные смолы, особенно в условиях воздействия высокой влажности или температуры.

Таблица 2-1

Типичные значения * удельных сопротивлений некоторых хороших диэлектриков

Диэлектрик	Удельное поверхностное сопротивление ρ_S, *ом*	Удельное объемное сопротивление ρ_V, *ом см*
Полистирол	10^{16}	10^{17}—10^{19}
Политетрафторэтилен (тефлон)	$3{,}5 \cdot 10^{13}$	10^{16}
Полиэтилентерефталат (майлар)	10^{13}	10^{13}

* Данные этой таблицы следует считать заниженными, особенно для тефлона и майлара. (*Прим. ред.*).

СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Методы измерения R_{is} для диэлектриков описаны в предыдущем разделе, но для практики важно знать сопротивление изоляции готового конденсатора при его использовании

в электрической схеме. Сопротивление изоляции любого конденсатора снижается в условиях высокой влажности (если он не герметизирован) и при высокой температуре окружающей среды (вне зависимости от того, герметизирован конденсатор или нет).

Тщательно герметизированные конденсаторы не будут ухудшать своих свойств в условиях высокой влажности, а для конденсаторов с недостаточно удовлетворительной герметизацией падение сопротивления изоляции будет, грубо говоря, обратно пропорциональным качеству герметизации.

Зависимость сопротивления изоляции конденсатора от температуры обычно может быть выражена эмпирической формулой

$$R_1 = \frac{R_2}{e^{K(t_1 - t_2)}},$$

где R_1 — сопротивление изоляции при высокой температуре t_1;

R_2 — сопротивление изоляции при низкой температуре t_2;

e — основание натуральных логарифмов (2,718);

K — постоянная.

Для пропитанных бумажных и металлобумажных конденсаторов $K = 0,1$. При пропитке бумажных конденсаторов вазелином R_{is} снижается приблизительно вдвое при повышении температуры на каждые 7° С (в соответствии с этим значением K), а при пропитке маслом — на каждые 10° С.

Для керамических и слюдяных конденсаторов принимают $K = 0,05$. Снижение сопротивления изоляции керамических и слюдяных конденсаторов при колебании температуры в нормальных пределах невелико, и обычно поправки не требуется.

На рис. 2-6, 2-7 и 2-8 в виде серии кривых показан результат измерений, проведенных на бумажных пропитанных, металлобумажных, слюдяных и керамических конденсаторах. В каждом случае R_{is} измеряли сначала при комнатной температуре, затем при 70, 85, 100° С и снова при комнатной. Так как слюдяные конденсаторы, залитые воском, не выдерживают температуры 70° С и выше (воск расплавится), то они не подвергались этому испытанию.

Сопротивление изоляции конденсаторов всех типов измеряли при постоянном напряжении 500 *в*, за исключением металлобумажных конденсаторов. Последние испытывались при рабочем напряжении с последовательно включенным сопротивлением 10 *ком*.

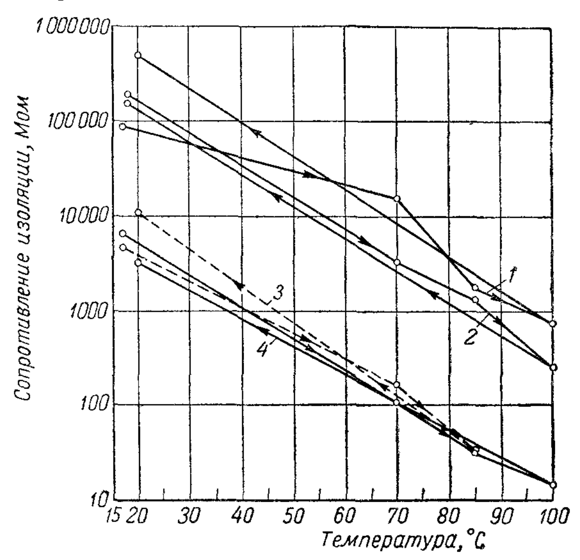


Рис. 2-6. Зависимость сопротивления изоляции бумажных конденсаторов, измеренного при напряжении 500 *в*, от температуры.

1 — бумажные цилиндрические; среднее из девяти образцов, по три каждого типа: 0,001 *мкф* × 350 *в*, 0,05 *мкф* × × 500 *в* и 0,1 *мкф* × 1000 *в*; *2* — металлобумажные цилиндрические, одноленточные; среднее из четырех образцов: 0,01 *мкф* × 400 *в* (измерение при 400 *в*); *3* — металлобумажные цилиндрические; среднее из девяти образцов, по три каждого типа: 0,1 *мкф* × 150 *в*, 0,5 *мкф* × 250 *в* и 1 *мкф* × 350 *в* (измерение при рабочем напряжении); *4* — бумажные в прямоугольных корпусах; среднее из шести образцов, по три каждого типа: 1 *мкф* × 600 *в* и 8 *мкф* × 800 *в*.

Из характера кривых видно, что R_{is} пропитанных бумажных конденсаторов в прямоугольных металлических корпусах падает при 100° С до нескольких десятков мегомов, в то время как цилиндрические типы при той же самой температуре, имея повышенное начальное сопротивление изоляции, могут снизить его до сотни мегом. Снижение сопротивления изоляции слюдяных конденсаторов зависит главным образом от материала опрессовки.

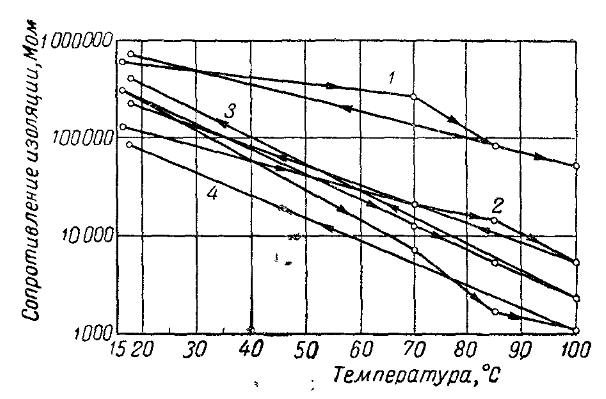


Рис. 2-7. Зависимость сопротивления изоляции слюдяных конденсаторов, измеренного при 500 *в*, от температуры.

1 — опрессованные эпоксидной смолой, среднее из 49 образцов; *2* — серебрёные, лишенные воскового слоя, среднее из 32 образцов; *3* — опрессованные полиэтиленом, среднее из 60 образцов; *4* — опрессованные бакелитом, среднее из 48 образцов.

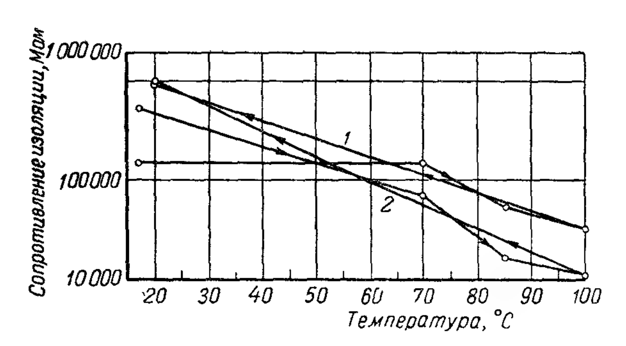


Рис. 2-8. Зависимость сопротивления изоляции трубчатых керамических конденсаторов от температуры при напряжении 500 *в*.

1 — изолированный тип, среднее из шести образцов, по три каждого сорта: 82 *пф* и 18 *пф* (для всех ТКЕ = = —750 10^{-6} *град*$^{-1}$; *2* — неизолированный тип, среднее из трех образцов: 100 *пф* и ТКЕ = +100 10^{-6} *град*$^{-1}$.

Измеряемое значение R_{is} определяется протеканием через диэлектрик трех составляющих тока: зарядной, абсорбционной и утечки. Чтобы точно определить сопротивление изоляции, необходимо соблюдать следующие условия:

1) измерительное напряжение должно быть равным рабочему напряжению;

2) температура и влажность должны контролироваться в очень узких пределах;

3) время зарядки следует оговорить, причем оно должно быть достаточным для стабилизации конденсатора.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Электрическая прочность материала определяется величиной напряженности поля, при которой происходит пробой. Напряженность поля в киловольтах на 1 *мм* (или вольтах на 1 *мк*), при которой пробивается диэлектрик, зависит от толщины материала, температуры, частоты и формы волны испытательного напряжения, метода проведения испытания и пр. Поэтому сравнивать различные материалы в идеале следует на образцах равной толщины и в идентичных условиях измерения.

Для определения электрической прочности к образцу, в котором сделаны углубления для того, чтобы получить возможно более однородное распределение поля, через электроды, армированные охранными кольцами, подводится постепенно повышающееся напряжение. Подготовка образцов играет весьма важную роль.

В качестве практического предела электрической прочности материала удобно принять напряжение начала разрядов, выше которого с течением времени начинает развиваться пробой. Это напряжение обычно много ниже предельной электрической прочности при кратковременном приложении напряжения. При напряжении выше начального разрядного возникает корона и начинается прогрессирующее разрушение материала. Испытание методом определения начального напряжения разрядов имеет то преимущество, что является «неразрушающим» испытанием, поскольку корона вызывает высокочастотные колебания, которые можно наблюдать и измерять, не доводя образец до пробоя.

Электрическая прочность материала всегда уменьшается, если он работает в условиях высокой температуры или повы-

шенной влажности. Немногие материалы полностью однородны, и обычно пробой связан с прохождением тока утечки вдоль определенного малого участка материала; этот участок нагревается, что приводит к быстрому разрушению или к искрению вдоль поверхности и, следовательно, к обугливанию органического материала. Неорганические материалы, такие, как стекло, керамика и слюда, обычно устойчивы против этой формы пробоя. Очень важно время приложения напряжения. Большинство диэлектриков при кратковременных воздействиях выдерживает значительно более высокие напряжения, чем при длительной работе. С увеличением частоты электрическая прочность падает, особенно при радиочастотах, в зависимости от коэффициента мощности материала и т. п.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НА ДИЭЛЕКТРИКИ И ГОТОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В области очень низких и очень высоких частот наблюдается увеличение потерь, которое практически ограничивает использование конденсатора с любым диэлектриком. При очень низких частотах в диэлектрике становятся заметными различные формы утечки, такие, как ток утечки на постоянном токе и долговременные поляризационные явления, которых не бывает на высоких частотах. При очень высоких частотах некоторые процессы, связанные с поляризацией диэлектрика, не успевают полностью проявиться и поэтому вызывают потери. Конденсатор с потерями можно заменить упрощенной эквивалентной схемой, показанной на рис. 2-9.

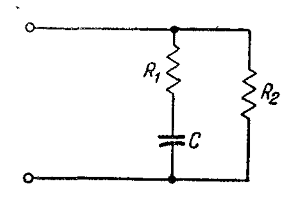


Рис. 2-9. Сопротивления, эквивалентные потерям в конденсаторе: R_1 — последовательное; R_2 — параллельное.

В области очень низких частот эта схема практически представляет собой чисто активное сопротивление: все токи протекают через параллельное сопротивление R_2 (сопротивление утечки на постоянном токе и т. п.). При очень высоких частотах ток протекает через емкость C, но все напряжение падает на последовательном сопротивлении R_1, и снова схема дает большие потери. Последовательное эквивалентное сопротивление обусловлено потерями в металли-

ческих частях — выводах конденсатора, слое серебра (в случае серебрёных слюдяных и керамических конденсаторов), переходном контактном сопротивлении и т. д. Эти потери ограничивают верхний предел рабочей частоты конденсатора независимо от типа использованного диэлектрика. Таким же образом потери в паразитных емкостях,

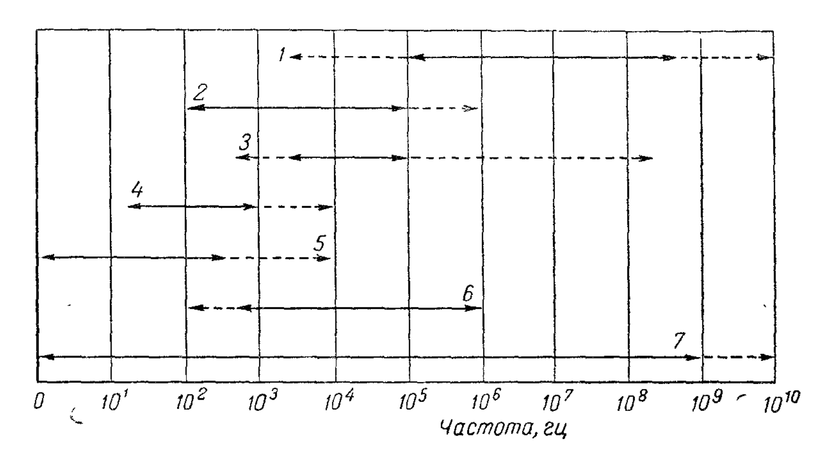


Рис. 2-10. Диапазоны частот, перекрываемые различными типами конденсаторов (пунктир показывает возможное расширение диапазона в связи с изменением номинальных данных или усовершенствованием конструкции).

1 — конденсаторы из слюды, стекла и керамики с малыми потерями; 2 — бумажные и металлобумажные конденсаторы; 3 — керамические конденсаторы из керамики с высокой ε; 4 — электролитические алюминиевые конденсаторы; 5 — танталовые электролитические конденсаторы; 6 — конденсаторы с диэлектриком из полярных пленок (полиэтилентерефталат, ацетат целлюлозы); 7 — конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок (полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен).

создаваемых конструктивным оформлением конденсатора (помещение в защитный корпус, опрессовка пластмассой и т. п.), ограничивают нижний предел рабочей частоты, так что не весь полезный диапазон частот, определяемый качеством диэлектрика, удается полностью использовать.

Диаграмма на рис. 2-10 показывает частотные диапазоны работы конденсаторов с различными диэлектриками. Конструкция конденсатора до некоторой степени может влиять на пределы рабочей частоты, что придает этой диаграмме ориентировочный характер.

Полное сопротивление конденсатора

Когда на конденсатор подано переменное напряжение, через него протекает ток

$$I = 2\pi f C U \; [a],$$

где C в фарадах, U в вольтах и f в герцах.

Тогда реактивное (емкостное) сопротивление конденсатора

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \; [ом].$$

Идеальный конденсатор имел бы только реактивное сопротивление X_C, но этому препятствуют потери в диэлектрике, корпусе и выводах. Кроме того, конденсатор в той или иной степени обладает и индуктивностью, реактивное сопротивление которой возрастает с частотой, в связи с чем при частоте выше определенного критического значения конденсатор ведет себя уже не как емкость, а как индуктивность. При резонансной частоте полное сопротивление конденсатора определяется его активным сопротивлением, зависящим от описанных выше потерь.

Каждый конденсатор резонирует при определенной частоте (в зависимости от его конструкции) и, имея индуктивность и активное сопротивление, обладает комплексным полным сопротивлением — емкостным в одном диапазоне частот, активным в другом и, наконец, индуктивным в третьем. Типичное изменение полного сопротивления бумажного конденсатора с частотой показано на рис. 6-6 (см гл. 6).

ТАБЛИЦА СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИИ

В табл. 2-2 и 2-3 указаны характеристики для большинства диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении. Более полные таблицы свойств диэлектриков, измеренных Лабораторией изоляционных исследований, опубликованы Хиппелем и его сотрудниками. Эти таблицы содержатся в книге «Диэлектрики и их применение».

Таблица 2-2

Свойства некоторых конденсаторных диэлектриков

Диэлектрик	Коэффициент мощности cos φ при 25° C, 60 *гц*	Коэффициент мощности cos φ при 25° C, 1 *кгц*	Диэлектрическая проницаемость в при 25° C и 60 *гц*	Емкость при 85°C относительно емкости при 25° C и 60 *гц*, %	Постоянная времени, *Мом·мкф* (500 *в* постоянного тока), 25° C	Постоянная времени, *Мом·мкф* (500 *в* постоянного тока), 85° C	Коэффициент абсорбции за 1 *мин* после разряда в течение 2 *сек*, %	Диапазон рабочих температур, ° C	Примечание
Бумага конденсаторная, пропитанная:									
минеральным маслом	0,002	0,0035	2,23	102	15 000	100	2,0	От —55 до +105	Максимальная рабочая частота приблизительно равна 1 *Мгц*
касторовым маслом	0,005	0,007	4,7	96	1 500	50	2,5	От —25 до +65	
кремнийорганической жидкостью	0,003	0,0035	2,6	101	20 000	150	1,0	От —60 до +125	
полиизобутиленом	0,002	0,003	2,2	101	20 000	150	1,0	От — 55 до +125	
хлорированным нафталином	0,004	0,005	5,2	93	4 000	50	2,5	От — 20 до +55	
хлорированным дифенилом	0,0025	0,003	4,9	96	10 000	100	2,5	От — 55 до +85	
Полиэтилентерефталат	0,0025	0,004	2,8	101	100 000	10 000	0,25	От —70 до +150	Максимум потерь между 1 и 10 *Мгц*
То же, при заливке кремнийорганической жидкостью	0,0025	0,0045	3,0	102	20 000	2 000	2,0	От —60 до +150	
Политетрафторэтилен	0,001	0,0005	2,05	99	10^6	10^5	0,02	От — 90 до +200	Максимальная рабочая частота 10 000 *Мгц*
То же, при заливке кремнийорганической жидкостью	0,001	0,0005	2,1	98	20 000	20 000	2,5	От — 60 до +200	
Пленка из ацетата целлюлозы	0,009	0,015	3,8	105	15 000	200	1,5	От —70 до +125	
То же, при заливке кремнийорганической жидкостью	0,01	0,016	3,8	104	8 000	100	2,5	От —60 до +125	
Полистирол	0,001	0,0005	2,6	99	10^6	10^5	0,02	От —70 до +85	Максимальная рабочая частота приблизительно 10 000 *Мгц*
Полиэтилен	0,001	0,0005	2,25	96	10^5	1 000	0,02	От —70 до +85	
Слюда (рубиновая)	0,0025	0,0006	5,5	100	10^5	1 000	0,7	От 60 до +160	

Таблица 2-3

Свойства некоторых конденсаторных диэлектриков

Диэлектрик	Потери при комнатной температуре. Предельная рабочая частота (приблизительная величина): минимальная, *гц*	максимальная, *Мгц*	Cos φ	Диэлектрическая проницаемость ε (в диапазоне рабочих частот)	Электрическая прочность, *кв/мм*	Диапазон рабочих температур, ° С (приблизительное значение): минимальный	максимальный
Стекло свинцово-щелочное	200	10 000	0,001	6,5—6,8	500	Не ограничен	+200
Стекло боросиликатное	100	10 000	0,001	4,0	500	» »	+200
Кварц (плавленый)	100	Выше 10 000	0,0002	3,8	1 000	» »	+300
Керамика на основе силиката магния с низкой диэлектрической проницаемостью	100*	10 000	0,001	5,4—7,0	200—300	» »	+150
Керамика со средней величиной диэлектрической проницаемости (на основе рутила)	500*	5 000	0,001	70—90	100—150	» »	+125
Керамика с высокой диэлектрической проницаемостью (на основе титанатов) **	1 000*	1 000	0,01	1 000—7 000	100	—100	+120

* Может работать при постоянном напряжении, но возможно небольшое изменение емкости.

** Характеристики зависят от температуры. Максимум диэлектрической проницаемости — при 120° С. Диэлектрическая проницаемость зависит от напряжения. Ниже 120° С гистерезис и потери зависят от температуры. Другие материалы с высокой ε имеют максимум при иных температурах.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Важнейшие характеристики конденсатора определяются его диэлектриком. Поэтому обычно конденсаторы классифицируются по виду диэлектрика: бумага, слюда, керамика и т. д. В табл. 3-7 приведены некоторые важнейшие характеристики конденсаторов постоянной емкости, а в табл. 3-8— переменных конденсаторов.

Военные спецификации для конденсаторов постоянной емкости и для переменных конденсаторов, описанные соответственно в гл. 5 и 14, являются рабочими документами, предусматривающими индивидуальные требования к конденсаторам различных типов. В последующем изложении будут сделаны ссылки или на эти спецификации или на типовое обозначение того или иного частного вида конденсатора: система восьми спецификаций в целом не может быть здесь рассмотрена детально. Если потребуются дополнительные сведения, касающиеся военных спецификаций, то их можно найти в книге «Техника применения радиодеталей в военном оборудовании», том 1, раздел 1 (см. библиографию).

Бумажные пропитанные конденсаторы

Бумажные пропитанные конденсаторы являются изделиями широкого общего применения. Они изготовляются намоткой из двух или более слоев бумаги (диэлектрика), расположенных между двумя лентами металлической фольги, и затем пропитываются. Эти конденсаторы имеют следующие характеристики (при сравнении со слюдяными конденсаторами):

1) цена относительно невелика;

2) коэффициент мощности относительно высок (до 0,01 при 25° С и 1 *кгц*, от 0,005 до 0,04 при —55° С, в зависимости от пропитки);

3) удельная емкость высока;

4) рабочее напряжение постоянного тока среднее;

5) отклонение емкости от номинала (начальное) большое: возможно ±5%, обычно ±10% или больше.

Максимальное допускаемое рабочее напряжение бумажного пропитанного конденсатора зависит от температуры

окружающей среды. Срок жизни конденсатора приблизительно обратно пропорционален пятой степени рабочего напряжения при температурах до 85° С. В соответствии со спецификацией MIL-C-25 для всех конденсаторов указывается номинальное рабочее напряжение при 40° С. В спецификации приведены кривые снижения рабочего напряжения при повышении температуры для каждого варианта конструкции конденсаторов. Величина требуемого снижения напряжения изменяется в зависимости от буквенного обозначения конденсатора, которое указывает на тип пропитки, и от энергии, запасаемой конденсатором при полной зарядке. Для конденсаторов с запасом энергии 0—0,5 *дж* указывают номинальное рабочее напряжение при температуре до 45° С для групп D, E и F; до 75° С — для групп A и B и до 85° С — для группы K. Для конденсаторов с бо́льшим запасом энергии оговариваются другие кривые снижения напряжения в зависимости от температуры.

Изучение надежности работы показало, что для конденсаторов в типичных условиях применения наблюдается пропорциональность между количеством выходов из строя и отношением приложенного напряжения к номинальному. Например, в одном из таких опытов за 5000 *ч* работы выход конденсаторов из строя составил 0,26% для рабочего напряжения, равного 25% $U_{ном}$ и 1,6% для 100% номинального напряжения.

Для работы при переменном напряжении бумажные пропитанные конденсаторы должны быть специально отобраны или разработаны, так как размеры корпуса (площадь его поверхности), пропитка и другие конструктивные данные влияют на выбор номинального напряжения. Допускаемая переменная составляющая для бумажного конденсатора постоянного напряжения зависит от типа пропиточной массы и от конструкции. Поэтому конденсаторы, поставляемые разными поставщиками, чрезвычайно разнообразны. Спецификация MIL-C-25 устанавливает, что сумма постоянного напряжения и амплитуды переменной составляющей не должна превышать номинального напряжения при условии, что эта амплитуда при частоте 60 *гц* не будет превышать 20% номинального напряжения, при 120 *гц* — 15% и при 10 *кгц* — 1%.

Постоянная времени бумажных пропитанных конденсаторов при комнатной температуре (25° С) составляет от 1500 до 20 000 *Мом · мкф* (в зависимости от сорта бумаги

и пропиточной массы), но быстро падает при повышении температуры окружающей среды. Для маленьких цилиндрических герметизированных конденсаторов (пропитка типа «К») постоянная времени может уменьшиться от 20 000 *Мом · мкф* при 25° С до 20 *Мом · мкф* при 125° С. Это снижение обратно пропорционально величине емкости при ее значениях выше 1 *мкф*. Изменение емкости с температурой в основном связано с типом пропиточной массы, причем наибольших изменений можно ожидать при низких температурах. Допускаемые изменения емкости при —55° С в сравнении с ее значением при +25° С при различных типах пропиточных масс указаны в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Допускаемое изменение емкости при температуре — 55° С по отношению к значеиию, измеренному при 25° С, для бумажных конденсаторов, пропитанных разными типами масс

Буквенное обозначение типа пропитки по спецификации MIL-C-25	Пропиточная масса	Изменение *С*, %
D	Касторовое масло	От + 5 до —15
A, F	Хлорированная синтетическая масса	От —20 до —30
B, E	Минеральное масло	От + 2 до —10
K	Полиизобутилен, кремнийорганические жидкости	От — 2 до — 5
Нет	Минеральный воск	От — 2 до — 6
Нет	Хлорированный нафталин	От — 5 до —10

Коэффициент мощности при 25° С и 1 *кгц* изменяется от 0,003 до 0,01, увеличиваясь с частотой. При напряжении 5 *в* и меньше или в условиях высокочастотной вибрации и ударов применяется конструкция конденсаторов с выступающей фольгой (см. гл. 6), так как конструкция с вкладными контактами требует приложения достаточно высокого напряжения, чтобы переходное сопротивление в контактах было малым. Бумажные опрессованные пластмассой конденсаторы, предусмотренные спецификацией MIL-C-91, хуже герметизированных типов в металлических корпусах, указанных в спецификации MIL-C-25. В условиях повышенной влажности сопротивление изоляции опрессованных конденсаторов много ниже и в процессе старения заметно ухудшается. В тех случаях, когда требуется малая емкость

на землю, удобно применять конденсаторы в герметизированных керамических корпусах. Хотя конденсаторы этой конструкции после 1000 *ч* испытаний на срок службы имеют лучшую стабильность емкости, повышенное сопротивление изоляции и меньшее изменение угла потерь, чем аналогичные конденсаторы в металлических корпусах, применять их следует с осторожностью, так как у этой конструкции при термических ударах иногда нарушается герметичность. Испытание образцов бумажных конденсаторов на хранение в течение 2 лет в соответствии со спецификацией MIL-C-25 и предшествующей спецификацией JAN-C-25 показало, что при температуре $50 \pm 2°$ C и относительной влажности 90—95% происходит прогрессирующее снижение сопротивления изоляции, ухудшается угол потерь и электрическая прочность конденсаторов и снижается их напряжение перекрытия. При такой же или более низкой температуре в сочетании с пониженной относительной влажностью характеристики также ухудшаются, но медленнее. Во всех вариантах климатических условий испытанные конденсаторы с аксиальными выводами типа CP21 и CP04 показали наименьшее изменение характеристик. Наиболее устойчив тип CP63, несколько хуже тип CP55 и наименее устойчив тип CP41.

По своему применению бумажные пропитанные конденсаторы подразделяются на следующие группы: блокировочные, буферные, шунтирующие, конденсаторы связи и фильтровые.

Когда требуется более повышенная надежность, чем это предусмотрено спецификацией MIL-C-25, или способность противостоять удару и высокочастотной вибрации, конденсаторы должны быть выбраны по спецификации MIL-C-14157. Цилиндрические конденсаторы с аксиальными выводами, подвергающиеся воздействию высокочастотной вибрации и ударов, всегда должны крепиться скобами.

Металлобумажные конденсаторы

Конструкция металлобумажных конденсаторов такова, что воздушные зазоры между бумагой и обкладками, существующие в обычных бумажных фольговых конденсаторах, полностью исключаются. Эти конденсаторы были разработаны и освоены в производстве в конце 40-х годов. В металлобумажном конденсаторе одна сторона бумаги метал-

лизируется перед намоткой. При номинальном напряжении до 600 *в* такие конденсаторы имеют меньший размер, чем бумажные пропитанные конденсаторы того же номинала. Это преимущество особенно заметно при номинальных напряжениях до 100 *в* постоянного тока и емкостях выше 0,01 *мкф*, когда уменьшение объема может достигать 75%.

Кроме того, если при воздействии напряжения происходят пробой и короткое замыкание обкладок, то в металлобумажных конденсаторах происходит процесс самовосстановления электрической прочности. При пробое бумаги очень тонкий слой металла быстро испаряется вокруг места пробоя, предотвращая образование постоянного короткого замыкания. Максимальное напряжение, при котором еще сохраняется самовосстановление, определяет величину испытательного напряжения. Максимальное напряжение, которое может быть кратковременно приложено к выводам конденсатора без его разрушения, называется напряжением искрения. Это максимальное напряжение следует прикладывать не более чем на несколько секунд, в противном случае непрерывное искрение быстро разрушит конденсатор.

Постоянная времени металлобумажных конденсаторов при 25° С составляет от 250 до 2000 *Мом · мкф*, т. е. обычно в 6—10 раз меньше, чем у бумажных фольговых конденсаторов, хотя некоторые вновь разработанные типы и сравнимы с фольговыми (например, тип 116P фирмы «Спрег электрик К°»). Металлобумажные конденсаторы нельзя применять для емкостной связи контуров, но можно использовать в цепях развязки или сглаживания, когда основным требованием является малая величина полного сопротивления.

На переменном токе металлобумажные конденсаторы следует использовать с осторожностью. Номинальное напряжение постоянного тока не может быть просто пересчитано на величину напряжения переменного тока. Коэффициент пересчета, принятый для конденсатора какого-либо определенного номинала, может не подойти для конденсаторов с другими размерами, другим номинальным напряжением или иным типом конструкции. Допускаемые величины напряжения переменного тока для металлобумажных и бумажных фольговых конденсаторов различны в связи с плохой теплопроводностью металлизированных секций. Амплитудное напряжение при частоте 60 или 400 *гц* никогда не должно превышать величину номинального напряжения

постоянного тока. Это ограничивает величину переменного напряжения при малых емкостях, но при емкости выше 10 *мкф* надо уже учитывать опасность разогрева конденсатора. В этом случае предельное номинальное напряжение можно повысить, улучшив отвод тепла от пакета секций к корпусу конденсатора.

Металлобумажные конденсаторы нельзя использовать в тех случаях, когда происходят частые перенапряжения, так как при этом могут снизиться емкость и сопротивление изоляции и возрасти тангенс угла потерь. Если два конденсатора соединены параллельно, то обычно к каждому из них последовательно подключается сопротивление 1 *ком* для подавления перенапряжения, которое могло бы возникнуть при пробое одного из конденсаторов и повредить второй.

Коэффициент мощности металлобумажных конденсаторов при 25° С и частоте 1 *кгц* находится в пределах от 0,005 до 0,015. По спецификации MIL-C-18312 конденсаторы выпускают на два предела рабочих температур: группа N от —55 до 125° С и группа М от —55 до 100° С.

Слюдяные конденсаторы

Слюдяные конденсаторы изготовляют, набирая их в виде стопки из очень тонких пластинок слюды, переложенных слоями фольги, или нанося слой серебра непосредственно на поверхность слюдяных пластинок для уменьшения колебания емкости от термического расширения за счет удаления воздуха из зазоров между диэлектриком и обкладками. Стопку затем сжимают, присоединяют выводы и конденсатор опрессовывают пластмассой или покрывают слоем компаунда для защиты от механических повреждений и воздействия окружающей среды.

Конденсаторы имеют следующие характеристики:

1) цена более высокая, чем у бумажных конденсаторов;

2) коэффициент мощности при 25° С и 1 *кгц* равен 0,001, при 1 *Мгц* уменьшается до 0,0002;

3) добротность *Q* высокая, обычно порядка 2500 при емкости от 100 до 1000 *пф* при 1 *Мгц*; по MIL-C-5 требуется не менее 1200; при более высоких и более низких значениях емкости уменьшается;

4) удельная емкость низкая по сравнению с бумажными конденсаторами;

5) рабочее напряжение постоянного тока: возможно получение высоких номинальных напряжений;

6) отклонение емкости от номинала (первоначальное) небольшое, до ±0,25%, хотя по MIL-C-5 предусмотрено минимальное значение ±2%.

Важнейшими характеристиками слюдяных конденсаторов являются малый угол потерь (в широком диапазоне частот), высокое рабочее напряжение, малое изменение емкости с температурой и при старении. Стабильность конденсаторов из серебрёной слюды выше стабильности конденсаторов фольгового типа, которые после 10 лет работы при комнатных условиях давали изменение емкости ±3% (даже в случае образцов хорошего качества). Прецизионные слюдяные конденсаторы, используемые в качестве вторичных образцов емкости, были изготовлены с допуском менее 0,01% при значениях емкости более 1 *мкф*. Их герметизируют для защиты от влияния окружающей среды на стабильность емкости. Конденсаторы этого типа имеют высокое постоянство емкости во времени: после 10 000 *ч* испытания при комнатной температуре емкость конденсаторов с номиналом 10 000 *пф* осталась неизменной с точностью ±0,2 *пф*. Температурный коэффициент мал, и величина его зависит: от метода стяжки стопки пластин и типа обжимок; от месторождения и качества обработки слюды; от типа конструкции конденсатора (фольговый тип или из серебрёной слюды).

Таблица 3-2

Температурные характеристики слюдяных конденсаторов в соответствии с военным стандартом MIL-C-5

Обозначение группы по стандарту	Температурный коэффициент емкости, *град*$^{-1}\cdot 10^{-6}$	Изменение емкости после термических циклов
B	Не нормируется	Не нормируется
C	±200	±0,5%
D	±100	±0,3%
E	От —20 до +100	±0,1% + 0,1 *пф*
F	От 0 до +70	±0,05% + 0,1 *пф*

В табл. 3-2 приведены допускаемые значения температурных коэффициентов и изменение емкости слюдяных конденсаторов во времени, предусмотренные военным стандартом MIL-C-5.

Слюдяные серебрёные конденсаторы имеют лучшую температурную стабильность, чем конденсаторы с обкладками из фольги, поэтому группы повышенного качества — C, D, E и F (только с аксиальными проволочными выводами) — обычно изготовляются из серебрёной слюды. Оба типа показывают небольшое необратимое изменение емкости после температурных циклов, но это явление сильнее выражено у конденсаторов с фольговыми обкладками. У большинства типов слюдяных конденсаторов зависимость изменения емкости от температуры несколько отклоняется от линейной. Средние значения температурных коэффициентов для различных образцов одной и той же партии колеблются в относительно широких пределах. Хорошие температурные коэффициенты (как в группе E или даже лучше) при стабильности емкости ±0,05% могут быть получены у конденсаторов, которые для герметизации окунают в компаунд и применяют теперь в транзисторной технике.

Сопротивление изоляции слюдяных конденсаторов, так же как и других типов, уменьшается с повышением температуры. Например, R_{is} конденсатора типа CM35 емкостью 10 000 *пф* уменьшается от среднего значения 50 000 *Мом* при 25° C до среднего значения 15 000 *Мом* при 85° C и до 200 *Мом* при 175° C. В настоящее время слюдяные конденсаторы изготовляются для работы при номинальном напряжении и температуре окружающей среды 125 и 150° C.

Конденсаторы из серебрёной слюды допускают меньшую нагрузку током, чем конденсаторы из фольги, поэтому они менее пригодны для работы при больших токах. Это ограничивает их применение при радиочастотах и в импульсных схемах. Испытание конденсаторов типа CM20, CM65 и CM55 показало, что при хранении в условиях относительной влажности 40—50% и температуры 25±2° или 50 ± 2° C в течение 18 месяцев их характеристики изменяются незначительно. Однако после хранения в течение 6 месяцев при 50 ± 2° C и относительной влажности 90—95% некоторые конденсаторы пришли в полную негодность. При проверке электрической прочности и сопротивления изоляции через все образцы протекал чрезмерно большой ток, что практически соответствовало короткому замыканию обкладок.

Слюдяные конденсаторы выпускают для ряда технических применений: блокировочные, шунтирующие, высоко-

частотные, буферные, конденсаторы связи, фильтровые (высокочастотные) и для фиксированной настройки (высокое напряжение, большой ток).

«Пуговичные» слюдяные конденсаторы

Специальный тип слюдяных конденсаторов, называемый «пуговичным», имеет характеристики, подобные характеристикам опрессованных типов конденсаторов, описанных выше. По военному стандарту MIL-C-10950 предусматриваются две группы конденсаторов (B и D) с параметрами, подобными тем же группам по стандарту MIL-C-5. Выпускаются два типа таких конденсаторов: негерметизированный для работы при температуре до 85° С с относительно низким сопротивлением изоляции в условиях повышенной влажности и герметизированный для работы при температурах до 125° С с высоким сопротивлением изоляции при всех климатических условиях. Эти конденсаторы пригодны для работы при частотах до 500 *кгц* в цепях шунтирования, емкостной связи и настройки.

Керамические конденсаторы

Керамические конденсаторы изготовляются из трех основных классов керамики: 1) с низкой диэлектрической проницаемостью и малыми потерями; 2) со средней величиной диэлектрической проницаемости и повышенной температурной стабильностью; 3) с высокой диэлектрической проницаемостью.

Конденсаторы первого класса обычно изготовляют из стеатита или других подобных материалов. Диэлектрическая проницаемость стеатита примерно равна 8,0; другие материалы этого типа могут иметь $\varepsilon = 6 \div 15$. Эти диэлектрики обладают превосходными характеристиками при частотах свыше 50 *кгц*. Коэффициент мощности относительно мал (0,001) и приближается к уровню потерь слюды. Температурный коэффициент ε лежит в пределах $+80$ и $+120 \cdot 10^{6}$ *град* ^{1}. Температурный коэффициент емкости конденсаторов отдельных партий различается меньше, чем у конденсаторов с любыми другими диэлектриками, исключая стекло и вакуум. Конденсаторы работают при сравнительно высоких напряжениях, порядка 500 *в* (в зависимости от размеров), в интервале температур от — 55 примерно до + 150° С.

Ко второму классу относятся керамические конденсаторы, изготовленные из керамики со средней диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6 \div 110$. В основном это термокомпенсирующие конденсаторы. Температурный коэффициент емкости этих конденсаторов изменяется в пределах от $+100$ до $-800 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ в зависимости от содержания двуокиси титана в составе керамики. Соответственно изменяется и величина ε. Коэффициент мощности мал и при частоте 1 *Мгц* находится в пределах от 0,04 до 0,4%. Военная спецификация MIL-C-20 предусматривает следующие номинальные величины температурного коэффициента емкости (ТКЕ): +100, 0, —30, —80, —150, —220, —330, —470 и $-750 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Разброс значений ТКЕ от указанных здесь номиналов приводит к необходимости оговорить допускаемое его отклонение: ΔТКЕ. Кривая температурного изменения емкости нелинейна, а поэтому номинальное значение ТКЕ по MIL-C-20 изображается наклоном отрезка кривой ΔC, определяемой интервалом температур от 25 до 85° С. Кривая ТКЕ $= f(t)$ не является прямой, проходящей через значение $t = 25°$ С, поэтому значения ТКЕ и ΔТКЕ оговорены в стандарте MIL-C-20 в виде серии цифр, причем величина ΔТКЕ показана в виде огибающей для диапазона температур от —55 до +85° С. По стандарту MIL-C-20 имеются четыре группы значений ΔТКЕ: *G*, *H*, *J* и *K*, которые соответствуют значениям ±30, ±60, ±120 и $\pm 250 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ для диапазона температур 25—85° С. Допуски указаны как плюсовые, так и минусовые для того, чтобы можно было вычислить максимальное и минимальное отклонения ТКЕ от номинала. Необходимо еще раз подчеркнуть, что все эти цифры лишь приблизительные и действительны только между 25 и 85° С. Точные значения могут быть получены по кривым, приведенным в стандарте MIL-C-20. При использовании этих конденсаторов для термокомпенсации надо выбирать их расположение в аппаратуре с таким расчетом, чтобы кривая зависимости температуры конденсатора от времени прогрева была такой же, как у той части схемы, для которой осуществляется термокомпенсация.

Конденсаторы, выпускаемые по данному стандарту, кроме обычных испытаний на воздействие окружающей среды, проверяются также в условиях высокочастотной вибрации и удара. Характеристики конденсаторов приведены в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Характеристики керамических конденсаторов (Термокомпенсирующие конденсаторы по спецификации MIL-C-20)

Характеристика	Требования спецификации MIL-C-20	Номинальная величина
Изменение емкости	0,2% или 0,5 *пф* в зависимости от того, какая величина больше	0,01 – 0,15%
Добротность при 1 *Мгц*	$\geqslant$500 при $C = 5$ *пф*; $\geqslant$1000 при $C \geqslant 30$ *пф*	720—2 500
Сопротивление изоляции в *Мом* при $t = 25°$ С	$\geqslant$750	750 000—1 000 000

Испытание конденсаторов типа СС20, СС36 и СС35 на длительное хранение показало, что после пребывания в течение 6 месяцев при температуре 50 ± 2° С и относительной влажности 90—95% большой процент конденсаторов теряет электрическую прочность, а добротность снижается, например, с 1300 до 190. Сопротивление изоляции этих конденсаторов, как и других типов, снижается с температурой. В табл. 3-4 приведены величины сопротивления изоляции конденсатора емкостью 24 *пф* с номинальным напряжением 500 *в* (тип СС21СН240J по стандарту MIL-C-20B) после испытания в различных условиях.

Таблица 3-4

Изменение сопротивления изоляции с температурой для керамического конденсатора $C_н = 24$ *пф*, $U_н = 500$ *в* постоянного тока

Температура, ° С	Сопротивление изоляции, *Мом*, при напряжениях		
	500 *в*	625 *в*	750 *в*
25°	50 000	50 000	50 000
1 *ч* при 175°	9 000	8 000	4 000
5 *ч* при 175°	9 000	7 000	1 000

Термокомпенсирующие керамические конденсаторы используют для следующих целей: для емкостной связи, для фиксированной настройки (при высоких частотах), для температурной компенсации, в качестве шунтирующих.

Конденсаторы третьего класса из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью имеют большую удельную емкость. Однако их емкость и коэффициент емкости резко изменяются с температурой; для обеих характеристик это изменение происходит нелинейно и неполностью обратимо. Например, у конденсатора с диэлектриком, имеющим $\varepsilon = 1200$, наблюдается резко выраженный максимум емкости при температуре 110° С (точка Кюри). Коэффициент мощности проходит через минимум в области температур 20—40° С. У всех керамических конденсаторов с высокой ε наблюдаются подобные максимумы и минимумы при различных температурах. Во всех случаях чем выше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем более резко зависит емкость конденсатора от температуры. Помимо изменений с температурой, емкость уменьшается также при воздействии постоянного напряжения, особенно при прохождении через температурный максимум. Если при температуре 25° С емкость уменьшается на 10—20%, то в точке Кюри она может снизиться на 50%. Рабочее напряжение ниже, чем для конденсаторов из керамики с низкой диэлектрической проницаемостью. Для конденсаторов данного типа свойственно явление гистерезиса, поэтому они пригодны для работы при низком переменном напряжении. В результате старения емкость конденсаторов данного класса уменьшается, снижение емкости может достигать 25% за первые 1000 *ч* старения. Эффект старения обычно имеет асимптотический характер и ослабевает со временем. Свойства конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью настолько резко изменяются под воздействием температуры, напряжения, частоты и при испытании на старение, что трудно указать средние значения их параметров.

Керамические конденсаторы данного класса выпускаются в соответствии со стандартом MIL-C-11015 и применяются для следующих целей: в качестве шунтирующих (на радиочастоте); для емкостной связи (в промежуточных контурах, когда нужна большая емкость); в качестве фильтровых.

Стеклянные конденсаторы

Конденсаторы с диэлектриком из стекла были разработаны для замены слюдяных конденсаторов, так как высококачественная слюда импортируется и является де-

фицитным материалом. Секции стеклянных конденсаторов набирают из чередующихся слоев стеклянной ленты в виде тонкой пленки толщиной 12,7—25 *мк* и алюминиевой фольги и спекают в монолитный блок. Стекло может быть получено очень однородным. Так как ε стекла выше, чем у слюды, то объем стеклопленочных конденсаторов меньше объема слюдяных той же емкости. Сопротивление изоляции при 25°С обычно порядка 150 000 *Мом*; по стандарту MIL-C-11272 требуется не менее 10 000 *Мом*. Стеклянные конденсаторы имеют положительный температурный коэффициент, порядка $140 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Они весьма стабильны, их емкость и добротность совершенно постоянны. При 1 *Мгц* и 25° С добротность конденсаторов с емкостью от 10 до 1000 *пф* обычно не менее 2000. В соответствии со стандартом MIL-C-11272 добротность должна быть не ниже следующих значений:

Емкость, *пф*	5—20	20—500	1 000	10 000
Добротность *Q*	1 500	1 400	1 200	700

Поскольку корпус конденсатора изготовляется из того же материала, что и диэлектрик между обкладками, легко получить высокое значение добротности при малых емкостях; малая индуктивность выводов, непосредственно присоединенных к обкладкам, дает высокое значение *Q* и при больших емкостях.

По MIL-C-11272 предусмотрены конденсаторы с проволочными аксиальными выводами. Конденсаторы рассчитаны на работу при температуре окружающей среды до 85 и 125° С (при соответствующем снижении номинального напряжения). Шкала номинальных значений стеклянных конденсаторов разработана для замены всех типов слюдяных конденсаторов по MIL-C-5. Стеклянные конденсаторы используют для следующих целей: для блокировки, настройки, для емкостной связи и в качестве шунтирующих.

Стеклоэмалевые конденсаторы

Стеклоэмалевые конденсаторы изготовляют методом напыления или прессования слоев стеклоэмали и серебряной пасты до получения нужного числа слоев диэлектрика и обкладок. Затем заготовку спекают для того, чтобы образовалась монолитная остеклованная структура.

Стеклоэмалевые конденсаторы имеют следующие характеристики:

1) превосходные высокочастотные характеристики (коэффициент мощности снижается с частотой при ее изменении от 1 *кгц* до 1 *Мгц*, после чего увеличивается с ростом частоты вплоть до 100 *Мгц*);

2) в диапазоне температур от —55 до +200° С общее изменение емкости составляет 5%;

3) температурный коэффициент емкости равен $115 \pm \pm 25 \cdot 10^{6}$ *град*$^{-1}$;

4) способность работать при соответствующем снижении напряжения при температуре 200° С;

5) стабильность емкости во времени высока, необратимое изменение емкости менее 0,08%;

6) очень высокое R_{is} при 25° С, выше 10^5 *Мом*;

7) хорошая добротность; при 25° С и 1 *Мгц* добротность $Q = 1800 \div 3000$;

8) тангенс угла диэлектрических потерь при 25° С приблизительно равен 0,001; при 200° С достигает величины порядка 0,01;

9) постоянная времени при 100° С выше 10 *Мом · мкф*.

Как и в случае стеклянных конденсаторов, корпус изготовляют из того же материала, который используется в качестве диэлектрика между обкладками; это устраняет опасность появления короны у краев обкладок при высоком напряжении.

Стеклоэмалевые конденсаторы применяют в тех же цепях, что и стеклянные конденсаторы.

Пленочные конденсаторы

Пленочными конденсаторами называются конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок, например из полистирола, полиэтилентерефталата (майлар), политетрафторэтилена (тефлон), которые используются или самостоятельно, или в сочетании с другим диэлектриком. Полистирольные конденсаторы изготовляют уже в течение многих лет. Они имеют следующие характеристики:

1) постоянная времени очень высока: при комнатной температуре (+25° С) превышает 10^6 *Мом · мкф*, при повышении температуры до +65° С снижается незначительно;

2) диапазон рабочих температур от —55 до 65° С (некоторые типы конденсаторов малой емкости могут работать при температуре до +85° С);

3) коэффициент мощности при 25° С порядка 0,0005 (сравним с cos φ для слюдяных конденсаторов) и не зависит от частоты;

4) диэлектрическая абсорбция низкая; это допускает использование конденсаторов в цепях с большой постоянной времени;

5) температурный коэффициент емкости отрицательный, может достигать —200 · 10^{-6} *град* $^{-1}$ в зависимости от конструкции конденсатора;

6) необратимое изменение емкости во времени меньше 0,2%;

7) добротность Q выше 4000.

Полистирольные конденсаторы выпускают для следующих областей применения: для цепей точной выдержки времени, для интегрирующих устройств, для настроенных контуров с высокой добротностью и в качестве образцов емкости.

Полиэтилентерефталат (майлар) — перспективный диэлектрик и в будущем может в значительной мере заменить собой бумагу. Однако для его свойств характерна определенная температурная и частотная зависимость. Верхний предел его рабочей температуры выше, чем у бумаги, и достигает 150° С. Однослойные секции из этой пленки пропитываются полистиролом, минеральным маслом и другими подобными веществами для заполнения сквозных отверстий; могут быть также намотаны секции с двумя (и более) слоями пленки, как в случае бумажных конденсаторов.

Пленка отличается хорошей механической прочностью и может легко металлизироваться методом испарения в вакууме. Так как эта пленка чувствительна к влаге, то конденсаторы необходимо герметизировать.

Конденсаторы с диэлектриком из пленки майлар имеют следующие характеристики:

1) постоянная времени при 25° С обычно вдвое выше, чем у бумажных конденсаторов (при 25° С выше 50 000 *Мом·мкф*, при 150° С обычно выше 10 *Мом·мкф*);

2) рабочая температура до 150° С, обычно при условии значительного снижения номинального напряжения;

3) тангенс угла потерь не более 0,01 при 85° С и не более 0,015 при 150° С;

4) диэлектрическая абсорбция небольшая, меньше, чем у слюдяных конденсаторов, если не применена пропитка кремний органической жидкостью;

5) изменение емкости не более ±4% при изменении температуры от —55 до +85° С, не более ±20% при изменении температуры от —55 до +150° С.

Конденсаторы с диэлектриком из полиэтилентерефталата используют в тех же цепях и устройствах, что и обычные бумажные конденсаторы, когда требуется более высокое сопротивление изоляции, более высокая рабочая температура и меньшая абсорбция, чем для бумажного конденсатора.

Конденсаторы с диэлектриком из пленки политетрафторэтилена (тефлон) способны работать при еще более высокой температуре (до 200°С), однако трудно изготовить пленку толщиной 6,3 и 12,7 *мк* с требуемыми характеристиками.

Конденсаторы этого типа имеют следующие характеристики:

1) постоянная времени высокая; при 25° С она выше 10^6 *Мом·мкф*, при 200° С обычно выше 200 *Мом·мкф*;

2) диапазон рабочих температур от —55 до +200° С;

3) диэлектрическая абсорбция малая, такая же, как у полистирола;

4) температурный коэффициент емкости отрицательный, порядка $-200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

5) тангенс угла потерь низкий, менее 0,0005 при 25° С;

6) отклонение емкости от номинала до ±1%;

7) добротность выше 5000;

8) изменение емкости в диапазоне температур от —55 до +200° С менее ±4%.

В связи с дороговизной конденсаторы с диэлектриком из пленки этого типа используются только там, где необходимы высокая рабочая температура, низкий угол потерь, высокая добротность, очень высокое сопротивление изоляции и малое изменение емкости с температурой.

Конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок выпускаются в соответствии со стандартом MIL-C-11978.

Электролитические конденсаторы

Выдающаяся характеристика электролитических конденсаторов — очень высокая удельная емкость, т. е. емкость, рассчитанная на единицу объема. Это преимущество особенно заметно при малых рабочих напряжениях. Электролитические конденсаторы можно изготовлять несколькими способами. Существенным признаком является нали-

чие двух электродов, погруженных в электролит, с электрохимически полученной пленкой окиси, которая работает в качестве диэлектрика на одном или на обоих электродах.

1. Полярный алюминиевый электролитический конденсатор — наиболее старый тип электролитического конденсатора. Конденсаторы наматываются, подобно бумажным, из лент гладкой или травленой фольги. На поверхность одной из лент, анодной или положительной, нанесен слой оксида. Травление фольги (или шоопирование ткани, что является другим вариантом конструкции) увеличивает активную поверхность, в результате чего достигается значительное увеличение емкости конденсатора. Детали этой конструкции описаны в гл. 9.

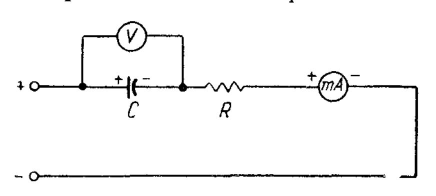


Рис. 3-1. Схема включения установки для подформовки электролитических конденсаторов.

C — конденсатор; *R* — защитное сопротивление; *V* — вольтметр; *mA* — миллиамперметр.

С, мкф	Напряжение постоянного тока, *в*	*R, ом*
8—100	15—50	1000
8—100	Выше 50	5000
10 и выше	15—50	1000

Номинальное напряжение, *в*	Коэффициент *K*
15—100	0,01
101—250	0,02
251—350	0,025
351—450	0,04

При длительном хранении электролитические конденсаторы необходимо периодически подформовывать. Через 6 месяцев хранения при комнатной температуре, если ток утечки конденсаторов велик, оксидная пленка должна быть вновь подформована следующим методом. На конденсатор с последовательно подключенными к нему сопротивлением и миллиамперметром подается напряжение с таким расчетом, чтобы номинальное значение напряжения поддерживалось на выводах конденсатора в течение 30 *мин* *. Схема соединения показана на рис. 3-1.

* Ток утечки при подформовке должен быть ограничен при помощи добавочного сопротивления до оговоренной величины.

Номинальная мощность сопротивления должна быть не менее 2 *вт*, а величину сопротивления выбирают в зависимости от номинальных данных конденсатора, который подвергается подформовке. Через 30 *мин*, если емкость не попадет в определенные пределы или ток утечки превышает значения, рассчитанные по приведенной ниже формуле, конденсатор должен быть отбракован.

$$I = KC + 0{,}3,$$

где I — ток утечки, *ма*;

C — емкость, *мкф*;

K — постоянная, зависящая от номинального напряжения.

Электрические свойства электролитических алюминиевых конденсаторов изменяются в широких пределах в зависимости от условий эксплуатации. Некоторые примеры приведены ниже.

а) Емкость. При повышении температуры от 25 до 85° С емкость несколько возрастает (на 10%) и уменьшается при снижении температуры до —20° С. При более низких температурах емкость быстро падает. Емкость также несколько снижается с повышением частоты: в интервале частот от 60 *гц* до 10 *кгц* она снижается примерно на 10%.

б) Коэффициент мощности. При 120 *гц* и 25° С $\cos\varphi = 0{,}02 \div 0{,}35$; при 85° С он обычно незначительно уменьшается и резко возрастает при —40° С. Значительное увеличение $\cos\varphi$ наблюдается также при возрастании частоты. Вместо того чтобы характеризовать потери значением $\cos\varphi$ или $\operatorname{tg}\delta$, в обычной практике используют величину r_s последовательного сопротивления, эквивалентного потерям. Как $\cos\varphi$, так и $\operatorname{tg}\delta$ зависят и от реактивной, и от активной составляющих сопротивления конденсатора. Эквивалентное последовательное сопротивление характеризует только активную часть полного сопротивления, а величина его определяется потерями в металлических частях и удельным сопротивлением электролита. Обычно величина r_s определяется главным образом проводимостью электролита и в меньшей степени сопротивлением металлических электродов, контактов и выводов.

в) Ток утечки. Сопротивление изоляции электролитических конденсаторов очень мало, а потому обычно вместо него рассматривается величина тока утечки конденсатора. Ток утечки изменяется с температурой: он очень мал при

—40° С, но при 85° С почти в 3 раза превышает свое значение при 25° С. Ток утечки увеличивается также с увеличением напряжения на выводах конденсатора; в первый момент после приложения напряжения ток очень высок, но быстро спадает со временем. Через 1—5 *мин* величина тока утечки стабилизируется. Конденсаторы с различными номинальными данными сравниваются по величине отношения тока утечки к произведению из емкости на напряжение $\left(\frac{мка}{мкф \cdot в}\right)$. Этот метод оценки до некоторой степени сравним с применением величины постоянной времени (*ом · ф*) для оценки качества бумажных и пленочных конденсаторов.

г) *Полное сопротивление конденсатора.* Увеличение полного сопротивления *Z* наблюдается при понижении температуры: при —40° С оно в 5—7 раз больше, чем при +25° С. При более низких температурах рост *Z* еще больше. При увеличении частоты *Z* заметно снижается; так, например, если производить измерение при температуре 85° С, то полное сопротивление конденсатора уменьшается с 20 *ом* при частоте 120 *гц* до 0,3 *ом* при 10 *кгц*.

Оксидный слой в электролитическом конденсаторе формуется при номинальном напряжении, поэтому снижение рабочего напряжения при повышении температуры дает мало выгоды. Для обеспечения максимальной надежности и длительного срока службы допускаемое рабочее напряжение конденсатора должно быть не более 80% номинального напряжения. Тогда при воздействии перенапряжений не будет превышен номинальный предел. Перенапряжения, равные по величине номинальному напряжению, можно прикладывать к конденсатору не более чем на 30 *сек* с интервалами 10 *мин*.

Оксидная пленка «стремится переформоваться» при любом напряжении, которое поддерживается в течение некоторого времени постоянным, поэтому необходимо избегать использования электролитических конденсаторов в схемах, где постоянное напряжение может значительно изменяться на длительное время в процессе работы.

В большинстве электролитических конденсаторов с металлическим корпусом, выпускаемых по стандарту MIL-C-62 (группы 1, 2 и 3-я), электролит не может быть полностью изолирован от корпуса. Между отрицательной обкладкой и корпусом (земля) имеется сопротивление неопределенной

величины. В устройствах, где отрицательная обкладка конденсатора не должна быть при потенциале земли, конденсатор помещают в изоляционную трубку.

Стандарт MIL-C-62 охватывает полярные сухие электролитические конденсаторы из алюминиевой фольги. Конденсаторы различаются по диапазону рабочих температур:

Группа C . . . . От —40 до +85° C
Группа F . . . . От —40 до +65° C

Электролитические конденсаторы, изготовляемые из алюминиевой фольги повышенной чистоты (99,99% Al), имеют улучшенные электрические характеристики: более длительный срок службы и хранения (порядка 2 лет при температуре не выше 40° C) и более низкий ток утечки.

Алюминиевые электролитические конденсаторы применяют в основном в качестве шунтирующих, фильтровых и для накопления энергии в импульсных устройствах.

2. **Неполярные электролитические конденсаторы** имеют ряд общих характеристик с полярным типом. В неполярном конденсаторе катодная неоксидированная фольга заменена вторым анодом — оксидированной фольгой. Толщина оксидной пленки на положительной и отрицательной обкладках одинакова. Неполярные конденсаторы, известные под названием пусковых конденсаторов, применяют для пуска однофазных асинхронных электродвигателей. Их изготовляют в соответствии со стандартом MIL-C-3871.

3. **Танталовые электролитические конденсаторы** обладают повышенным качеством по сравнению со старыми типами алюминиевых конденсаторов. Они имеют следующие преимущества:

1) бóльшую удельную емкость;

2) увеличенный допускаемый срок хранения от 5 до 10 лет, поскольку оксидная пленка на тантале более стабильна, чем на алюминии;

3) более широкий интервал рабочих температур;

4) более низкие значения тока утечки и коэффициента мощности;

5) более длительный срок службы.

Основные характеристики танталовых конденсаторов приведены в табл. 3-5.

В зависимости от метода изготовления различают несколько типов танталовых электролитических конденсаторов с различными характеристиками.

Таблица 3-5

Основные характеристики танталовых конденсаторов

Наименование характеристики	Изменение характеристики	
	при снижении температуры до —55° C	при повышении температуры до +85° C
Емкость	Уменьшается	Увеличивается
Ток утечки	Уменьшается	Увеличивается
Эквивалентное последовательное сопротивление потерь	Увеличивается	Уменьшается

а) Фольговый тип. Конденсаторы этого типа изготовляют из гладкой нетравленой фольги (тип CL34 и CL35 по MIL-C-3965) и травленой фольги (тип CL24 и CL25 по MIL-C-3965). Они могут быть изготовлены полярными и неполярными. Работоспособны в пределах температур от —55 до +85° С и при специальной двойной герметизации торцов синтетическим каучуком и политетрафторэтиленом— до + 125° С.

Таблица 3-6

Сравнение электрических характеристик танталовых электрических конденсаторов различной конструкции

Наименование характеристики	Величина характеристики конденсаторов		
	из травленой фольги	из нетравленой фольги	жидкостных с объемно-пористыми анодами
Изменение емкости:			
при 85° С	+60%	+25%	+10%
при —55° С	-40% при $U_н$=75 *в*, —55% при $U_н$ = 15 *в*	—40% при $U_н$=75 *в*, —45% при $U_н$ = 15 *в*	—15% при $U_н$=75 *в*, —35% при $U_н$ = 10 *в*
Ток утечки, $\frac{мка}{мкф \cdot в}$:			
при 85° С	0,06	0,20	0,005
при 25° С	0,01	0,05	0,001
Полное сопротивление, *ом · мкф*, при —55° С	2000 при $U_н$ = 15 *в*, 1500 при $U_н$ = 75 *в*	2200 при $U_н$=15 *в*, 1500 при $U_н$ = 75 *в*	2500 при $U_н$ =10 *в*, 1500 при $U_н$ = 75 *в*

б) Объемно-пористый тип. Эти конденсаторы разработаны в двух видах. Первый — преимущественно малой емкости на низкое рабочее напряжение (тип CL44 по MIL-C-3965).

Емкость и рабочее напряжение конденсаторов второго вида могут быть различными, так как конденсатор набирается из ряда отдельных элементов (тип CL15 по MIL-C-3965). Каждый элемент представляет собой пористую таблетку из танталового порошка, заключенную в корпус с жидким электролитом. Тип CL15 может работать при температуре окружающей среды от —55 до + 175° С со снижением номинального напряжения. Некоторые важнейшие характеристики танталовых конденсаторов различных типов конструкции представлены в табл. 3-6.

Указанные типы конденсаторов выпускают в соответствии с военным стандартом MIL-C-3965. Стандарт предусматривает требования, предъявляемые как к полярному, так и к неполярному типу конденсаторов. Конденсаторы групп В, С, D по стандарту MIL-C-3965 имеют следующие пределы рабочей температуры:

Группа В . . . . От —55 до + 85° С
Группа С . . . . От —55 до +125° С
Группа D . . . . От —55 до +175° С

Танталовые конденсаторы используют в тех же технических устройствах, что и алюминиевые электролитические конденсаторы, но только тогда, когда требуется большой срок хранения, шире диапазон рабочих температур или нужно снизить удельный объем.

в) Танталовые конденсаторы твердого типа (оксидно-полупроводниковые конденсаторы). При изготовлении твердых танталовых конденсаторов используют аноды из гладкой и травленой танталовой проволоки или объемно-пористые аноды, спеченные из порошка тантала. Характеристики этих субминиатюрных конденсаторов отличаются от характеристик конденсаторов с жидким электролитом. В конденсаторах малой емкости, приблизительно до 0,1 *мкф*, анодом служит нетравленая танталовая проволока; для получения больших емкостей используют аноды из травленой проволоки или объемно-пористые. Вместо электролита служит двуокись марганца, поверх слоя которой наносят медное покрытие. Удельный объем конденсаторов очень мал. Танталовый конденсатор емкостью 4,7 *мкф* с номинальным напряжением 10 *в* постоянного тока имеет диаметр 3,1 *мм* и длину 6,3 *мм*. Конденсаторы выпускают со следующими характеристиками:

1) диапазон рабочих температур от —55 до +85° С (способны кратковременно работать при температуре до —80° С);

2) рабочее напряжение до 50 *в* включительно;

3) температурный коэффициент емкости порядка $+600 \times \times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$;

4) диэлектрическая абсорбция такого же порядка, что и у бумажномасляных конденсаторов с такими же номинальными данными;

5) полное сопротивление в диапазоне частот от 10 *кгц* до 10 *Мгц* примерно такое же, что и у бумажных конденсаторов той же емкости;

6) тангенс угла потерь увеличивается с температурой (в противоположность бумажным конденсаторам) и при +85° С не превышает 0,05;

7) ток утечки увеличивается с ростом температуры и приложенного напряжения; величину тока утечки обычно определяют в виде отношения значения тока к произведению из емкости на напряжение: $\frac{мка}{мкф \cdot в}$; ток утечки конденсатора на напряжение 35 *в* при 85° С составляет величину порядка 0,175 *мка*.

В отличие от обычных электролитических конденсаторов, для конденсаторов с твердым полупроводниковым электролитом способ герметизации не имеет существенного значения, так как у них не может быть потери электролита.

Танталовые конденсаторы твердого типа используются в схемах с транзисторами, где требуются конденсаторы большой емкости и с малым удельным объемом; выпускаются они по стандарту MIL-C-21720.

Воздушные конденсаторы

Воздушные конденсаторы применяются как образцовые меры емкости при лабораторных измерениях. При соответствующей конструкции и качестве использованных материалов изменение емкости конденсаторов в течение ряда лет не превышает 0,01% при больших значениях номинальной емкости. Сравнение некоторых характеристик этих конденсаторов с характеристиками конденсаторов постоянной емкости других типов дано в табл. 3-7.

Таблица 3-7

Сводка некоторых важных характеристик конденсаторов постоянной емкости

Тип конденсаторов (по военным спецификациям)	Наименьший допуск по емкости, %	Cos φ при 1 *кгц* или *Q* при 1 *Мгц* (25° С)	ТКЕ × 10^6, *град*$^{-1}$	Сопротивление изоляции, *Мом* (в конце испытания на срок службы, минимальное значение)	Длительность испытания на срок службы (по MIL)	Максимальное изменение емкости после испытания на срок службы	Максимально допустимая температура при длительной работе
Пропитанные бумажные (MIL-C-25)	±10	0,004—0,010	Не гарантнруется	30% исходной нормы	250 *ч* при максимальной рабочей температуре и 90—190% $U_{ном}$ в завнсимости от пропитки и запаса энергин	10%	85 или 125° С в зависимости от типа пропитки
Металлобумажные (MIL-C-18312)	±10	0,005—0,015	Не гарантируется	$\frac{1}{3}$ исходной нормы	1000 *ч* прн $U_{ном}$	10%	85 или 125° С
Слюдяные опрессованные (MIL-C-5)	±2	0,001—0,005	В — не гарантнруется С — ±200 D — ±100 Е — +100 и —20 F — +70 и 0	7 500	1000 *ч* при максимальной рабочей температуре н 150% $U_{ном}$	3% или 0,5 *пф* (что больше)	85, 125 или 150° С *
Стеклопленочные (MIL-C-11272)	±2	0,001	140±25	10 000	1000 *ч* при 85° С и 150% $U_{ном}$	2% или 1 *пф* (что больше)	85 нли 125° С *
Стеклоэмалевые (спецификации MIL нет)	±2	0,001	115±25	Не гарантируются			85° С
Керамическне термокомпенсирующие (MIL-C-20)	±1	Не менее 1000	От +100 до —200 От 0 до —300 От —30 до —420 От —80 до —750 —1500	1 000	100 *ч* прн 750 *в* постоянного тока, +250 *в* переменного тока (амплнтуда)	3% или 0,5 *пф* (что больше)	85° С
Керамические общего прнменения (MIL-C-11015)	+100 —20	0,01—0,03 (меняется с температурой)	—1500 (нет линейности)	3 000	1000 *ч* при 200% $U_{ном}$ (постоянный ток)	Не гарантируется	85 или 150° С *

Продолжение

Тип конденсаторов (по военным спецификациям)	Наименьший допуск по емкости, %	Cos φ при 1 *кгц* или Q при 1 *Мгц* (25° С)	ТКЕ × 10^6 *град*$^{-1}$	Сопротивление изоляции, *Мом* (в конце испытания на срок службы, минимальное значение)	Длительность испытания на срок службы (по MIL)	Максимальное изменение емкости после испытания на срок службы	Максимально допустимая температура при длительной работе
Слюдяные пуговичные (MIL-C-10950)	±2	0,001—0,005	В — не гарантируется D — ±100	7500 или 50000 (в зависимости от герметизации)	250 и 1000 *ч* при 750 *в* для конденсаторов на 85 и 125° С соответственно	3% или 0,5 *пф* (что больше)	85 или 125° С *
Полистирольные (MIL-C-19978)	±5	Не менее 4000	—120+30	60% исходной нормы	250 *ч* при 85° С и 115% $U_{ном}$	6% для значений менее 0,05 *мкф* и 3% для значений более 0,05 *мкф*	65° С (85° С при снижении $U_{ном}$)
Политетрафторэтиленовые (MIL-C-19928)	±5	Не менее 5000	Не гарантируется	60% исходной нормы	250 *ч* при 170° С и 115% $U_{ном}$	5%	170° С (200° С при снижении $U_{ном}$)
Полиэтилентерефталатные (MIL-C-11978)	±5	0,01 (меняется с температурой и частотой)	Меняется с температурой	60% исходной нормы	250 *ч* при 125° С и 50% $U_{ном}$	5%	125° С (150° С при снижении $U_{ном}$)
Алюминиевые электролитические (MIL-C-62)	От —10 до +150 (до 50 *в*) От —10 до +100 (до 350 *в*) От —10 до +50 (выше 350 *в*)	0,2—0,35 (при 120 *гц*)	Не гарантируются		1000 *ч* при $U_{ном}$	10%	65 или 85° С *
Танталовые электролитические (MIL-C-3965)	±2	0,02—0,20	Не гарантируются		2000 *ч* при $U_{ном}$	—	85, 125 или 175° С *
Танталовые оксидно-полупроводниковые (MIL-C-21720)	±10	0,04—0,06 (при 120 *гц*)	+600	Не гарантируется	1000 *ч* при $U_{ном}$	10%	85° С
Образцовые воздушные (спецификации MIL нет)	±0,01	0,00001	+10		Не гарантируются		25° С

* Различным значениям максимальной температуры соответствуют различия в основных характеристиках.

Вакуумные и газонаполненные конденсаторы

Вакуумные конденсаторы выпускаются как конденсаторы высокого напряжения для самолетных радиопередатчиков или как блокировочные и развязывающие конденсаторы для высоковольтного промышленного оборудования и средств связи. Емкость вакуумных конденсаторов составляет от 1 до 500 *пф* при напряжениях от 3 до 120 *кв* (пиковое значение). Они рассчитаны на номинальные токи от 14 до 500 *а* (при водяном охлаждении). Так как диэлектрическая проницаемость вакуума та же, что и воздуха, то удельная емкость конденсаторов мала.

Газонаполненные конденсаторы используют при очень высоких напряжениях — порядка 250 *кв*. Конденсаторы заполняют сухим чистым азотом при давлении до 10 $кГ/см^2$. Для каждого случая применения конденсаторы должны быть специально рассчитаны.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Переменные конденсаторы могут быть разбиты на пять основных классов: прецизионные, общего применения, для радиопередающих устройств, триммеры и специальные типы, например фазосдвигающие.

Прецизионные переменные конденсаторы

Эти конденсаторы уже много лет используют в основном как лабораторные вторичные образцы емкости в измерительных мостах и резонансных схемах. С такими переменными конденсаторами выпускают разнообразные измерительные приборы. Можно получить различные законы изменения емкости с углом поворота. Емкость конденсаторов достигает 5000 *пф* в единице. Возможно отклонение емкости от номинала порядка 0,01%. В нормальных условиях достигается высокая стабильность емкости: за несколько лет изменение емкости составляет менее 0,02%.

Конденсаторы общего применения

Конденсаторы данного типа используют прежде всего для настройки в широковещательных приемниках. Конденсатор может иметь от одной до четырех-пяти секций. Откло-

нение емкости конденсаторов от номинального значения составляет 1% или 1 *пф*. Коэффициент мощности воздушных переменных конденсаторов при 1 *Мгц* находится в пределах от 0,03 при установке на минимальную емкость до 0,06% при максимальной емкости.

Воздушные переменные конденсаторы конструируют с различным законом изменения емкости с углом поворота. В связи с этим различают прямоемкостные или прямолинейные, прямочастотные, прямоволновые и логарифмические конденсаторы. Их применяют в испытательном оборудовании и радиоприемниках различных типов. Обычный диапазон изменения емкости конденсаторов этого типа составляет около 400—500 *пф*, но можно изготовлять конденсаторы с пределом изменения емкости и в 10, и в 600 *пф*.

Конденсаторы для передающих устройств

Конденсаторы этого типа по конструкции подобны конденсаторам общего назначения, но рассчитаны для работы при более высоком напряжении, что достигается увеличением воздушного зазора между пластинами. Максимальные пределы изменения емкости составляют до 1000 *пф*. Чтобы предотвратить образование краевой короны, края пластин закругляют и шлифуют. В случае работы при высоком напряжении форме пластин и сборке уделяется особое внимание.

Чаще всего используют прямолинейные и прямочастотные переменные воздушные конденсаторы (см. гл. 14). Для пуш-пульных схем применяют конденсаторы с расщепленным статором. Заливка конденсаторов маслом повышает емкость и рабочее напряжение в 2—5 раз, в зависимости от диэлектрической проницаемости использованного масла. В контурах широковещательных радиостанций применяют высоковольтные газонаполненные переменные конденсаторы. Их заполняют азотом под давлением до 14 $кГ/см^2$. Специальный тип конденсатора для радиопередатчиков — вакуумный переменный. В его конструкции используется сильфон (для перемещения одной системы электродов относительно другой без нарушения вакуума). Диапазон перекрываемой емкости в единице составляет от 10 до 2000 *пф*. Конденсаторы могут быть изготовлены для работы при высоких напряжениях и большом токе нагрузки. Электри-

ческие характеристики типичного вакуумного переменного конденсатора таковы:

Изменение емкости	От 2 до 500 *пф*
Пиковое значение напряжения	20 *кв*
Максимальный ток (эффективное значение)	60 *а*
Размеры:	
длина	25,1 *см*
диаметр	11,1 *см*

Вакуумные переменные конденсаторы очень надежны, и срок их службы практически бесконечен, если не нарушается герметизация.

Подстроечные полупеременные конденсаторы

Подстроечные конденсаторы (триммеры) находят большое применение в радиоаппаратуре, главным образом для подгонки резонансных частот связанных контуров при промежуточных и радиочастотах. Различают четыре основных типа: 1) компрессионный тип с твердым диэлектриком (обычно слюда); 2) воздушный тип с вращательным движением ротора; 3) керамический тип с вращательным движением ротора; 4) цилиндрический, или пистонный, тип (твердый диэлектрик — керамика, стекло или пластмасса).

Диапазон перекрытия емкости подстроечных воздушных конденсаторов с вращающимся ротором составляет от 3 до 145 *пф*. Он обеспечивается несколькими конденсаторами, каждый из которых перекрывает меньшую емкость: 3,5—10, 6—75, 9—143 *пф* и т. д. Требования к этим конденсаторам оговорены стандартом JAN-C-92.

Подстроечные воздушно-слюдяные конденсаторы компрессионного типа имеют меньшие габариты, но перекрывают более широкий интервал емкости (от 15 до 3000 *пф*) также ступенями. Емкость типичного конденсатора изменяется в пределах от 15 до 130 *пф*. Эти конденсаторы непригодны для использования в военной аппаратуре.

Подстроечные керамические конденсаторы с вращающимся ротором обычно имеют более ограниченные пределы изменения емкости — от 1,5 до 7 *пф* и от 7 до 45 *пф* в соответствии с требуемым значением температурного коэффициента емкости. Конденсаторы выпускают по военному стандарту MIL-C-81, который предусматривает следующие

Таблица 3-8

Сводка некоторых важнейших характеристик конденсаторов переменной емкости и подстроечных

Тип конденсатора	Закон изменения емкости	Пределы изменения емкости, *пф*	Коэффициент мощности	Добротность	Рабочее напряжение, постоянный ток, *в*, над уровнем моря	Температурный коэффициент емкости, $\times 10^{-6}$, *град*$^{-1}$	Максимальная рабочая температура, °С	Примечание
Односекционный прецизионный	Прямоемкостный	100—1500	0,00001	—	1000	+10 (наилучшее значение)	—	—
Односекционный общего применения	Прямоемкостный и прямочастотный	15—100 и 350—550	0,001	—	750	+120	—	—
Многосекционный общего применения	Прямоемкостный и прямочастотный	15—100 и 350—550	0,001	—	750	+120	—	—
Многосекционный миниатюрный	Прямоемкостный	300—350	0,001	—	500	+150	—	—
Подстроечный воздушный плоского типа	Прямоемкостный	3,5—145	—	>250	C1 : 850 C2 : 1150 C3 : 1400	+50÷150	85	MIL-C-9
Подстроечный стеклянный пистонного типа	Прямоемкостный	0,5—30	—	>500	500	+100	125	MIL-C-14409
Подстроечный керамический	Прямоемкостный	7—45	—	>500	500	A: NPO B: N300 C: N500 D: N650	—	MIL-C-81
Подстроечный воздушно-слюдяной	Нелинейный	15—3000	0,001	—	250—500	Плохой	—	—

П р и м е ч а н и е. Значения коэффициента мощности указаны при частоте 1 *кгц*, а значения добротности — при 1 *Мгц*; в обоих случаях температура +25° С.

четыре группы с разными температурными коэффициентами емкости (ТКЕ, *град*$^{-1}$ · 10^{-6}):

Группа A . . . . В соответствии с керамикой типа NPO
» B . . . . —300
» C . . . . —500
» D . . . . —650

Пистонные, или цилиндрические, конденсаторы применяют для точной настройки малых емкостей. Диапазон перекрываемой емкости у этих конденсаторов ограничен.

В военном стандарте MIL-C-14409 оговорены требования только к конденсаторам со стеклом в качестве твердого диэлектрика. Эти конденсаторы имеют следующие основные характеристики:

1) температурный коэффициент емкости $\pm$ 100 · 10^{-6} × × *град*$^{-1}$;

2) предел рабочих температур от —55 до +120° С;

3) изменение емкости при температурных циклах ±0,04 *пф*.

Стандарт MIL-C-14409 предусматривает два варианта таких конденсаторов. Иногда требуются конденсаторы с диапазоном изменения емкости от 0,5 до 30 *пф*.

Основные характеристики переменных и подстроечных конденсаторов приведены в табл. 3-8.

ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ

Для обеспечения высокой степени надежности работы электронного оборудования необходимо выбирать и применять высококачественные радиодетали, используя их в тех условиях, на которые они рассчитаны. Много случаев выхода радиодеталей из строя может быть отнесено за счет неправильного выбора и применения их. Отдельными стандартами военного ведомства на конденсаторы надо пользоваться с известной осторожностью, хотя из этих стандартов можно получить полезные сведения о конструкции. Это прежде всего документы на покупку, предназначенные для оценки продукта с точки зрения его работы. В военных стандартах указывается только минимально допустимый уровень или значение какого-либо заданного параметра. Поскольку военные стандарты на радиодетали являются эксплуатационными документами, каждый производитель может использовать для изготовления деталей различные

материалы и технологические процессы. Это приводит к тому, что выпускаемые радиодетали по своему качеству часто превосходят требования стандарта, причем в различной степени. Если оборудование будет обслуживаться в полевых условиях, то не следует выбирать конденсаторы со свойствами, значительно превышающими требования стандарта. Запасные конденсаторы, полученные от другого поставщика и также удовлетворяющие требованиям стандарта, могут оказаться недостаточно удовлетворительными в сравнении с выбранными ранее наилучшими конденсаторами и не обеспечат необходимой работы аппаратуры.

В случае эксплуатационных стандартов, когда оговаривается только минимальное приемлемое значение, важным фактором, который часто недооценивают, является кривая ухудшения какого-либо параметра (например, емкости) при специальных испытаниях (например, на срок службы). С точки зрения долговременной надежности конденсатор с более низкими начальными и конечными значениями (более пологий наклон) может иметь преимущество перед конденсатором, показывающим более высокие значения, но при более резком их изменении в условиях испытания.

Выбор заданного типа конденсатора для какого-либо частного случая применения нередко представляет собой компромисс между требованием к электрическим характеристикам, механической конфигурации и имеющимся объемом для его размещения. Для конденсаторов любого типа должны быть учтены три основные ограничивающие характеристики: напряжение, рабочая температура и размеры. Поскольку конденсаторы находят широкое применение во всех видах электронного оборудования, для того чтобы помочь проектировщикам, можно дать следующие рекомендации.

I. Проектировщик должен хорошо знать общие климатические и другие требования к аппаратуре в целом, чтобы правильно поставить требования к качеству используемого конденсатора.

Для каждого конденсатора должны быть определены:

1) интервал рабочих температур;

2) минимальное рабочее атмосферное давление;

3) условия ударной нагрузки (амплитуда и время воздействия);

4) условия вибрации (частота и амплитуда);

5) наличие влажности;
6) наличие коррозионной атмосферы;
7) минимальный срок службы.

II. С учетом наиболее суровых условий, которые могут встретиться при работе, каждый случай применения конденсатора необходимо проанализировать с тем, чтобы определить:

1) минимальное допустимое изменение емкости;
2) минимальное сопротивление изоляции;
3) максимально допустимый ток утечки;
4) постоянную времени (при необходимости);
5) минимальную добротность (при необходимости);
6) максимальное рабочее напряжение постоянного тока;
7) максимальное рабочее напряжение переменного тока;
8) наличие перенапряжений (если они имеют место, то какова их амплитуда).

III. После анализа рабочих условий и определения указанных выше основных параметров для окончательного выбора конденсатора должны быть рассмотрены следующие вопросы.

1. Максимальное допустимое изменение емкости (стабильность емкости):

а) допускаемое отклонение емкости от номинала, оговоренное в стандарте;

б) изменение емкости с температурой (представленное или в виде температурного коэффициента емкости или как изменение емкости по отношению к ее величине при 25° С и выраженное в процентах);

в) изменение емкости с напряжением;

г) изменение емкости с частотой;

д) изменение емкости при воздействии ударов и вибрации;

е) изменение емкости при изменении давления;

ж) изменение емкости во времени;

з) обратимость изменений емкости.

2. Минимальная величина сопротивления изоляции:

а) при максимальной температуре;
б) при максимальном рабочем напряжении;
в) при воздействии влажности.

3. Максимальный ток утечки:

а) при максимальной рабочей температуре;
б) при воздействии влажности;
в) при максимальном рабочем напряжении,

4. Постоянная времени:

а) коэффициент абсорбции.

5. Минимальная добротность или максимальный коэффициент мощности:

а) изменение в интервале рабочих температур;

б) изменение в диапазоне рабочих частот.

6. Рабочее напряжение постоянного тока:

а) при максимальной рабочей температуре;

б) при минимальном атмосферном давлении.

7. Рабочее напряжение переменного тока:

а) при максимальной рабочей температуре;

б) при минимальном атмосферном давлении;

в) при рабочей частоте.

IV. Особое внимание должно быть уделено механической конструкции конденсаторов, для того чтобы гарантировать соответствующую герметизацию, необходимую защиту от коррозии, вибростойкость и стойкость к ударам.

После того как будут рассмотрены все вышеуказанные факторы, может быть сделан выбор конденсатора. Часто этот выбор будет по необходимости компромиссным, так как далеко не всегда можно подобрать конденсатор, отвечающий всем требованиям. Поэтому каждую из характеристик конденсатора надо тщательно оценить в свете предъявляемых требований.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ

Точное измерение емкости в широком диапазоне частот является весьма сложной проблемой, которой исследователи уделяли большое внимание в течение многих лет. Результаты их работ достаточно полно описаны в литературе, и в библиографии (раздел 3) приведено значительное число ссылок для более детальной информации. Поэтому ниже будут только кратко описаны обычные методы измерения емкости.

Полное сопротивление любого конденсатора можно измерить, применив последовательную или параллельную эквивалентную схему замещения, предусматривающую последоватлеьное или параллельное включение емкости (соответственно C_S или C_P) и сопротивления, эквивалентного потерям (соответственно R_S или R_P). Обычно последова-

тельную схему применяют при низких частотах, а параллельную — при высоких частотах. Точность измерения зависит, особенно при высоких частотах, от типа использованного оборудования, качества экранировки и чувствительности индикатора. Измерения емкости могут быть в общем случае разделены на измерения при низкой и при высокой частотах.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При звуковых частотах полные сопротивления паразитных утечек по последовательной эквивалентной схеме малы, поэтому весьма высокой точности измерительного устройства можно добиваться применением экранировки, правильным расположением составляющих и точным учетом необходимых поправок. Измерения следует проводить весьма тщательно. Прецизионная измерительная установка обычно представляет собой мостовую схему, которая может давать погрешность при измерении емкости не более $1 \cdot 10^{-6}$ и при измерении коэффициента мощности не более $5 \cdot 10^{-6}$ (в самых благоприятных условиях). Во многих мостах высокой точности используется образец взаимоиндукции, включаемый в два плеча мостовой схемы. Типовые мостовые схемы кратко описаны ниже.

Мост Карей — Фостера

Этот мост дает в результате измерения значения C_S и R_S по последовательной эквивалентной схеме. Элементарная схема соединений моста приведена на рис. 4-1, где M — образцовые катушки взаимоиндукции; Q — постоянное образцовое сопротивление; R — активное сопротивление катушки индуктивности L; R_S — сопротивление, эквивалентное потерям испытуемого конденсатора C_S.

При равновесии моста

$$C_S = \frac{M}{QR} \text{ и } R_S = Q\frac{L}{M} - 1.$$

Емкость соединительных проводов от моста к конденсатору должна быть измерена и вычтена из величины емкости, полученной при измерении. На мосте этого типа можно измерять емкости до 10 *мкф*, легко обеспечивая погрешность менее $1 \cdot 10^{-4}$.

Мост Шеринга

Этот мост (рис. 4-2) также дает составляющие последовательной эквивалентной схемы испытуемого конденсатора C_S и R_S.

На рис. 4-2 введем обозначения: C_2 — образцовый конденсатор постоянной емкости; C_S — испытуемый конденсатор; R_S — неизвестное последовательное сопротивление, эквивалентное потерям в конденсаторе C_S.

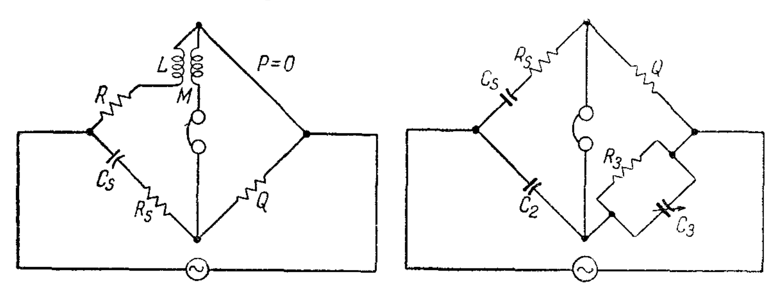


Рис. 4-1. Схема моста Карей—Фостера.

Рис. 4-2. Схема моста Шеринга.

Тогда при уравновешивании моста

$$C_S = \frac{R_3 C_2}{Q}, \qquad R_S = \frac{Q C_3}{C_2},$$

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_3 C_3 = \omega C_S R_S,$$

где δ — угол потерь, а $\omega = 2\pi f$;

f — частота приложенного напряжения.

Мост Шеринга имеет высокий класс точности и широко применяется. Модификации этого моста используются для большинства измерений конденсаторов при звуковых частотах, а также при технической частоте, включая измерения при напряжениях до 100 *кв*.

Обычные типы технических мостов

Эти мосты основаны на тех же принципах, что и мосты высокой точности, описанные выше, но в них применяют детали более низкого качества и упрощенную конструкцию. Погрешность измерения составляет от 0,1 до 1,0%. Есть много разновидностей мостов такого типа с подобной точ-

ностью измерения, широко используемых на практике. Типовая схема моста с последовательным включением сопротивления, эквивалентного потерям, приведена на рис. 4-3. Здесь Q и S — известные постоянные сопротивления. Для двух других плеч можно написать:

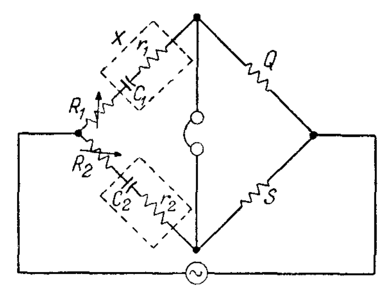


Рис. 4-3. Схема моста с последовательным включением сопротивления, эквивалентного потерям.

$$P = R_1 + r_1 \text{ и } R = R_2 + r_2;$$

далее:

$$C_1 = \frac{C_2 S}{Q},$$

где C_1 — испытуемый конденсатор;
C_2 — образцовый конденсатор.

При равновесии моста

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{S}{Q} = \frac{R}{P},$$

тогда

$$C_1 (R_1 + r_1) = C_2 (R_2 + r_2)$$

и

$$\omega C_1 R_1 - \omega C_2 r_2 = \omega C_2 R_2 - \omega C_1 r_1,$$

т. е.

$$\operatorname{tg} \delta_1 - \operatorname{tg} \delta_2 = \omega C_2 \left(R_2 - \frac{S}{Q} r_1 \right).$$

При измерении на мосте получают сопротивление по последовательной эквивалентной схеме. Для того чтобы определить $\operatorname{tg} \delta_1$ неизвестного конденсатора C_1, необходимо знать угол потерь δ_2 образцового конденсатора C_2. Погрешность при измерении емкости 0,2% и при измерении сопротивления 1—2%.

Методы замещения

Наиболее распространенным методом измерения на низких частотах является метод замещения неизвестного конденсатора точно известным конденсатором. Этот метод не позволяет определить сопротивление потерь, но зато дает возможность измерять емкости до 0,01 *пф*. Для про-

ведения измерений необходимо иметь образцовый переменный конденсатор и индикатор с высокой чувствительностью. Измерения методом замещения ограничиваются частотой порядка 100 *кгц* в зависимости от частотных характеристик образцового конденсатора и стабильности аппаратуры. Малые емкости могут быть измерены по величине ухода частоты настроенного контура (генератора), когда неизвестный конденсатор присоединяется параллельно емкости контура. При частоте порядка 10 *Мгц* и выше большое внимание приходится уделять исключению погрешностей, вызванных емкостными утечками и малыми индуктивностями.

Способ заземления Вагнера

Способ заземления моста, предложенный Вагнером, оказался очень полезным при точных мостовых измерениях, позволяя повысить чувствительность моста за счет ослабления влияния паразитных емкостей на землю, в частности емкости по отношению к корпусу моста.

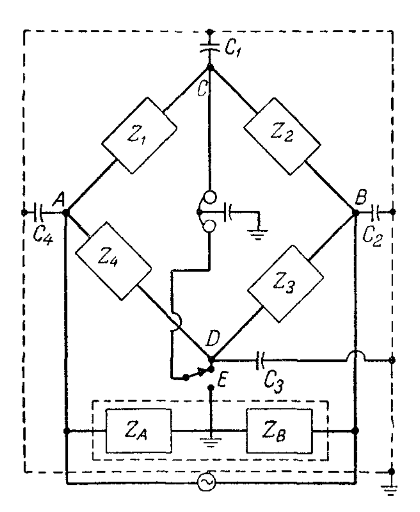


Рис. 4-4. Схема моста с заземляющей веткой Вагнера.

Схема моста с применением заземления Вагнера приведена на рис. 4-4. Конденсаторы C_2 и C_4, соединенные последовательно, шунтируют источник питания и не влияют на работу моста.

В условиях равновесия моста точки C и D имеют одинаковый потенциал, но при наличии конденсаторов C_1 и C_3 этот потенциал не равен потенциалу земли. Так как у индикатора часто есть емкость на землю, то даже при равновесии моста через индикаторную диагональ может протекать ток.

При измерении прежде всего необходимо, насколько это только возможно, уравновесить мост, подключить индикатор к средней точке между Z_A и Z_B и вторично уравнове-

сить мост с помощью этих двух полных сопротивлений. Указанная средняя точка соединена с землей, поэтому точка *C* также будет иметь потенциал земли, и точка *D* будет приведена к этому потенциалу в результате окончательного уравновешивания.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Трансформаторные мосты

Трансформаторные мосты, которые получили развитие главным образом после второй мировой войны, используются теперь в весьма широком диапазоне частот от 15 *кгц* до 250 *Мгц*. При частотах выше 50 *Мгц* мосты конструируют в основном для измерения полного сопротивления кабелей,

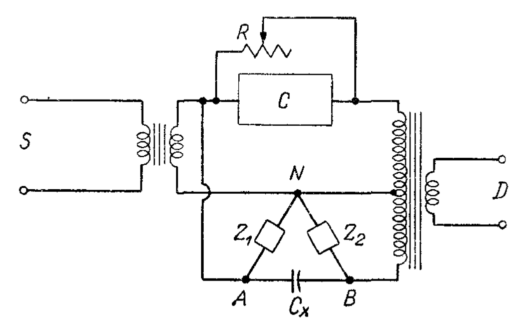


Рис. 4-5. Трансформаторный мост.

C_x — испытуемый конденсатор; *C* — образцовый переменный конденсатор; *R* — образцовое переменное сопротивление; *S* — источник питания; *D* — детекторный прибор.

но при использовании подходящих выводных соединений эти же мосты пригодны и для измерения малых емкостей. С помощью высокочастотных мостов можно измерить высокие значения коэффициента мощности только в том случае, когда эффективное параллельное сопротивление лежит в пределах от 10 *ом* до 10 *ком*. Погрешность при измерении сопротивления равна 1—2% (или $2{,}5 \cdot 10^{5}$ *ом*^{1} при измерении в виде проводимости). Поэтому точные значения можно получить только для конденсаторов с большими потерями.

Достоинство трансформаторных мостов — перекрытие широкого интервала частот и простота измерения. С их

помощью можно измерять также и значения индуктивности путем отсчета уменьшения емкости. Результат всегда получается в соответствии с параллельной эквивалентной схемой замещения.

Типичная элементарная схема трансформаторного моста приведена на рис. 4-5. Измеряемый конденсатор присоединен к выводам A и B. При наличии у конденсатора трех выводов используется и точка N, но емкость измеряется только между точками A и B, так как полное сопротивление Z_1 непосредственно шунтирует источник питания, а Z_2 шунтирует индикатор. В качестве последнего используется обычный приемник. Питание моста осуществляется от модулированного генератора.

Куметры

Обычные куметры используются для измерения емкости с погрешностью около 5% при частотах до 50 *Мгц*. Если к куметру подключать внешние образцовые переменные конденсаторы и вольтметр, то измерение можно проводить с погрешностью до 2% при частоте до 20 *Мгц*. При более высоких частотах влияния паразитных емкостей и индуктивности вносят бо́льшую погрешность. Тем не менее куметр является универсальным прибором, позволяя производить почти любое измерение полных сопротивлений в диапазоне частот от 50 *кгц* до 200 *Мгц*. Куметр может измерить полное сопротивление с погрешностью, зависящей от качества установки. Порядок работы на куметре описан ниже при рассмотрении вопроса об измерении коэффициента мощности.

Установка Хартсхорна и Уорда для испытания диэлектриков

Эта установка представляет собой исключительно точное высокочастотное устройство, основной частью которого является куметр высокого качества, перекрывающий диапазон частот от 10 *кгц* до 100 *Мгц*. Прибор предназначен для испытания электроизоляционных жидкостей или образцов твердых диэлектриков в виде плоских дисков, но, применяя соответствующие приспособления и выводы, можно измерить емкость и коэффициент мощности и у радиодеталей. Принципиальная схема соединений установки приведена на рис. 4-6.

Генератор индуктивно связан с настроенным контуром L, R и C_2. C_1 — испытуемый конденсатор, а C_2 — точно градуированный переменный конденсатор. Когда к настроенному контуру подсоединяют конденсатор C_1, резонанс нарушается. Емкостью C_2 вновь настраивают контур в резонанс, причем изменение емкости C_2 равно емкости подсоединенного испытуемого конденсатора. Для определения сопротивления потерь конденсатора C_1 используют метод переменного реактивного сопротивления.

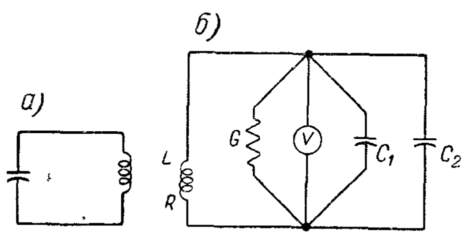


Рис. 4-6. Элементарная схема установки Хартсхорна и Уорда для испытания диэлектриков: *а* — генератор; *б* — измерительный контур.

При этом определяют активную проводимость G настроенного контура с емкостью C_1 и без нее. Погрешность измерения емкости составляет 1%, а значение измеряемой емкости может лежать в пределах от нуля до нескольких сотен пикофарад. Величину коэффициента мощности можно определять до значений порядка 0,0001.

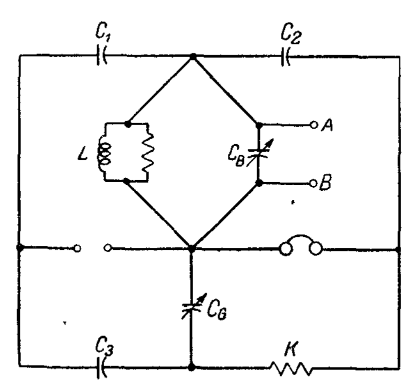


Рис. 4-7. Двойной Т-образный мост. *А* и *В* — зажимы для присоединения испытуемого конденсатора.

Двойные Т-образные мосты

Измерения при частотах вплоть до 50 или 100 *Мгц* часто проводят на двойных Т-образных мостах с погрешностью до 5%. Элементарная схема моста приведена на рис. 4-7.

Две Т-образные секции соединены параллельно. Для нулевого показания сумма приведенных полных сопротивлений обеих секций должна быть равной нулю. Емкостная проводимость измеряется путем изменения емкости конденсатора C_B и выражается прямо в пикофарадах.

Активную проводимость измеряют посредством изменения емкости конденсатора C_G, градуированного в микроомах. R — сопротивление в виде прямого отрезка проволоки. Индуктивность его при радиочастотах компенсируется подстроечным конденсатором, установкой которого добиваются того, что во всем рабочем диапазоне моста его реактивное сопротивление сводят к нулю.

Двойные Т-образные мосты предназначаются теперь для точных измерений на частотах до 150—200 *Мгц*. При весьма тщательном поддержании симметричности моста можно расширить рабочий диапазон. Сообщают, что простой мост Витстона, сконструированный в ФРГ, перекрывает диапазон частот от 0,1 до 1000 *Мгц* (см. библиографию).

Измерения при частотах выше 200 *Мгц*

Для измерений при частотах выше 200 *Мгц* применяют приборы типа линии Лехера (со стоячей волной), с помощью которых можно получить достаточно точные результаты. Надо отметить, что конденсаторы малой емкости редко используются при этих частотах, так как паразитная емкость контура может внести большую погрешность. При частотах выше 200 *Мгц* обычно представляет интерес лишь определение диэлектрических свойств материалов.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Выше были описаны методы измерения емкости как при низких частотах, так и при высоких до 200 *Мгц*. Эти же методы могут быть использованы для оценки диэлектрических свойств материалов при тех же частотах. При более высоких частотах используют коаксиальные линии, волноводы и полые резонаторы. В библиографии приведен ряд работ по данному вопросу. Ниже дается очень краткое описание принципиальных основ трех указанных методов.

Метод коаксиальной линии

Для измерений в интервале частот от 200 до 1000 *Мгц* применяют коаксиальные линии. Модулированный сигнал попадает в коаксиальную линию со щелью, вдоль которой, как показано на рис. 4-8, может перемещаться пробник, связанный с калиброванным усилителем. Эта линия закан-

чивается коаксиальной секцией, где в качестве диэлектрика используют материал, подлежащий исследованию. Стоячие волны, возникающие в коаксиальной линии при ее замыкании накоротко или при разомкнутом ее конце (иногда линия замыкается на реактивное сопротивление подходящей величины), регистрируют с помощью усилителя. Стоячие волны характеризуются величиной отношения минимального напряжения к максимальному и расположением точек максимума и минимума напряжения по отношению к концам линии.

Если линия со щелью заканчивается чисто активной нагрузкой, то максимум или минимум напряжения будет

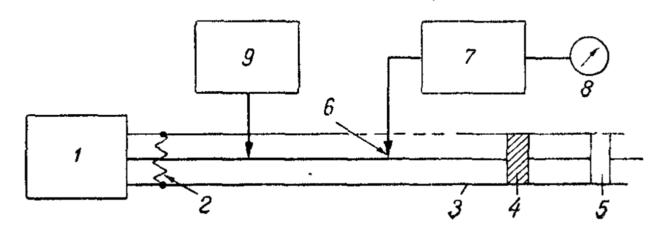


Рис. 4-8. Измерение свойств диэлектрика с помощью коаксиальной линии.

1 — генератор с заземленной сеткой; *2* — аттенюатор; *3* — коаксиальная линия; *4* — образец; *5* — плунжер; *6* — пробник; *7* — усилитель; *8* — измерительный прибор; *9* — регулятор выходной мощности.

находиться в конце измерительной секции. Максимум имеет место в том случае, когда активное сопротивление значительно больше полного сопротивления линии, а минимум — когда оно меньше. Чисто реактивная нагрузка приведет к иному распределению стоячих волн: если нагрузка вполне согласована с линией, то отражения не будет, следовательно, не будут наблюдаться и стоячие волны.

Если величина и фаза стоячей волны однажды были определены, то оконечное полное сопротивление может быть выражено через величину характеристического полного сопротивления линии по следующей формуле:

$$Z_i = \frac{Z_0 (Z_i + jZ_0 \operatorname{tg} \theta)}{Z_0 + jZ_i \operatorname{tg} \theta},$$

где Z_i — входное сопротивление;

Z_0 — характеристическое полное сопротивление;

θ — электрическая длина испытуемого образца (число длин волн).

В зависимости от того, разомкнут исследуемый участок, короткозамкнут или оформлен как-либо иначе, величина его полного сопротивления будет различной. Исходя из величин полного сопротивления, найденного для линий с двумя различными оконечными оформлениями, постоянную распространения и полное сопротивление образца можно найти по вышеуказанной формуле. Наиболее удобно это сделать, используя круговую диаграмму Смита. Детальные сведения по этому расчету можно найти в справочной литературе, например в работе Джексона и Хэксли (J. Inst. Electr. Engrs, London, vol. 91, part. III, p. 105, 1944), посвященной решению проблем передающих линий. Другие источники указаны в библиографии.

Метод волновода

В диапазоне частот примерно от 1000 до 3000 *Мгц* используют следующий метод измерения. Коаксиальные линии заменяют волноводами, в которых основные процессы по существу подобны описанным выше. Схематическое изображение установки приведено на рис. 4-9. Необходимо отметить, что длина волны в волноводе больше, чем в свободном пространстве, вследствие отражения от стенок, причем различно зависит от частоты колебаний и размеров волновода. При определенных условиях волна не сможет распространяться и, как говорят, будет отсечена. Однако заполненная секция (с испытуемым образцом) будет работать

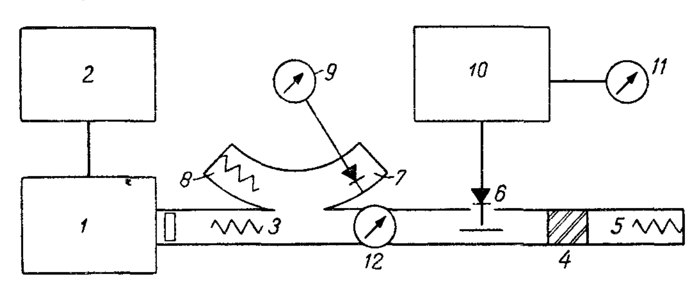


Рис. 4-9. Измерение свойств диэлектрика с помощью волновода.

1 — клистрон; *2* — источник высокого напряжения, модулированный прямоугольной волной; *3* — аттенюатор; *4* — образец; *5* — подобранная нагрузка или короткое замыкание; *6* — кристаллический пробник; *7* — детектор; *8* — подобранная нагрузка; *9* — измерительный прибор; *10* — усилитель; *11* — измерительный прибор; *12* — волномер.

в условиях, отличных от отсечки, и создавшиеся условия распространения окажутся почти такими же, как и в неограниченной среде. Принимая во внимание эти особенности, расчеты ведут так же, как и в случае измерения с применением коаксиальной линии.

Полые резонаторы

Для измерений при частотах выше 3000 *Мгц* применяют полые резонаторы. Колебания генерируются в полностью замкнутой полости простой формы. Скорость затухания этих колебаний определяют, когда образец исследуемого диэлектрика как поглощающий материал вводится в резо-

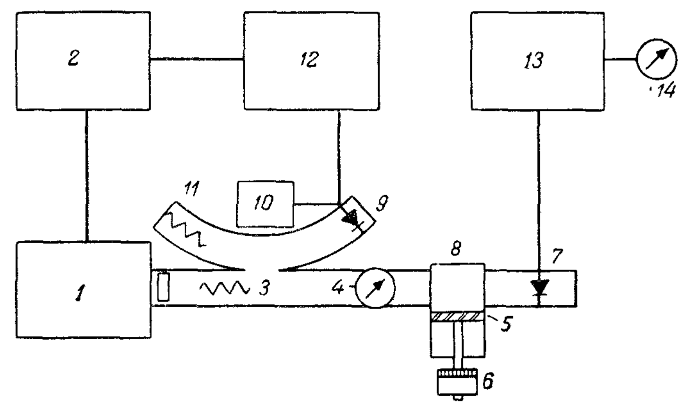


Рис. 4-10. Измерение свойств диэлектриков с помощью резонатора.

1 — клистрон; *2* — стабилизированный источник питания; *3* — аттенюатор; *4* — волномер; *5* — образец; *6* — микрометрическое устройство; *7* — кристалл; *8* — резонирующая полость; *9* — кристалл; *10* — сравнительная полость; *11* — подобранная нагрузка; *12* — стабилизированный контур; *13* — усилитель; *14* — измерительный прибор.

натор. Наиболее удобна цилиндрическая форма резонатора; по оси цилиндра располагают образец такой же цилиндрической формы. Затухание колебаний определяется шириной резонансной кривой резонатора. Этот способ подобен рассмотренному выше для случая куметра при измерении на более низких частотах.

Если измеряемые образцы изготовлены из материала с очень малыми потерями, то они могут занимать бо́льшую часть объема резонансной полости. Однако рассматривае-

мый метод пригоден и для диэлектриков с относительно высокими потерями при условии, что исследуемые образцы будут достаточно малыми. Схема установки приведена на рис. 4-10.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

При испытании образцов на мостах с последовательной эквивалентной схемой замещения коэффициент мощности равен $2\pi frC$, где r — последовательное сопротивление, эквивалентное потерям. Величины C и r отсчитывают непосредственно на мостах.

Мосты с параллельной эквивалентной схемой замещения отличаются тем, что сопротивление, эквивалентное поте-

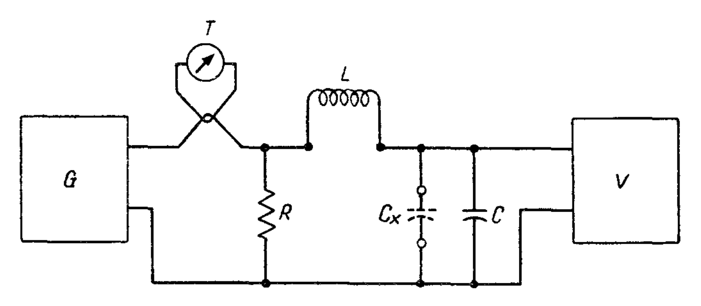


Рис. 4-11. Принципиальная схема куметра.

C_x — испытуемый конденсатор; C — образцовый переменный конденсатор; L — образцовая индуктивность; T — термопарный гальванометр; V — ламповый вольтметр; R — малое активное сопротивление; G — генератор переменной частоты.

рям, шунтирует измеряемую емкость, а не включено последовательно с нею. В этом случае коэффициент мощности равен $\frac{1}{2\pi fRC}$, где R — параллельное сопротивление, эквивалентное потерям.

Для измерения потерь можно использовать куметр. По этому методу первоначально настраивают контур в резонанс без испытуемого конденсатора, после чего снова настраивают уже с этим конденсатором, включенным параллельно к конденсатору настройки, как показано на рис. 4-11. Кривая резонанса позволяет измерить емкость; по высоте и ширине этой кривой можно вычислить потери и величину коэффициента мощности. Изменение емкости по отношению

к ее резонансному значению отсчитывают при напряжении, равном 0,707 максимальной величины (рис. 4-12).

Если C — емкость, а ΔC — изменение емкости (графически изображается на рис. 4-12 половиной отрезка AB), то добротность

$$Q=\frac{C}{\Delta C},$$

а коэффициент мощности равен

$$\frac{1}{Q}=\frac{\Delta C}{C}.$$

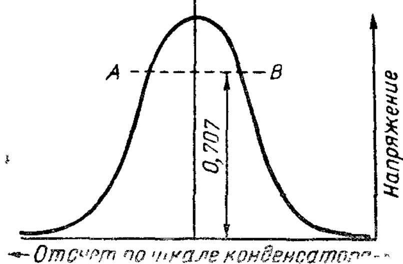


Рис. 4-12. Резонансная кривая, полученная на куметре.

Когда потери конденсатора очень малы, необходимо корректировать результат измерения для того, чтобы исключить потери в измерительном контуре. Для этого ширину резонансной кривой без испытуемого конденсатора вычитают из ширины кривой, полученной при включении конденсатора в контур.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЕМКОСТИ

Температурный коэффициент емкости α конденсатора определяется по формуле

$$\alpha=\frac{\Delta C}{C\Delta t}.$$

Если ΔC и C выражены в одинаковых единицах емкости, а Δt в градусах Цельсия (° С), то можно написать:

$$\alpha=\Delta C\cdot\frac{10^6}{C\Delta t}\ \text{миллионных долей на } 1^\circ\,\text{С}.$$

Уравнение предусматривает линейную зависимость в диапазоне температур Δt, а потому, указывая значение α, надо оговаривать и соответствующее значение Δt. Все измерения обычно проводят при частоте 1 *Мгц*. Температурные коэффициенты емкости (ТКЕ) обычно необходимо измерять для конденсаторов с диэлектриком из слюды, керамики, стеклоэмали, стекла, полистирола, политетрафторэтилена и воздуха. Такие конденсаторы имеют следую-

щие, предусмотренные военными стандартами пределы колебаний температурных коэффициентов емкости ТКЕ, *град*$^{-1}$ · 10^6:

Слюдяной	От —200 до +200
Керамический, трубчатый (обычный)	От 0 до +100
Керамический трубчатый или дисковый (термокомпенсирующий)	От —30 до —750
Стеклянный	От +115 до +155
Стеклоэмалевый	От +103 до +131

Различные военные спецификации указывают разные допуски на погрешность измерений температурного коэффициента емкости:

а) по спецификациям MIL-C-5, MIL-C-11272, MIL-C-10950 допустимое отклонение составляет ±0,025% номинальной емкости плюс 0,05 *пф* при допустимом колебании температурной ступени от 0 до +2° С;

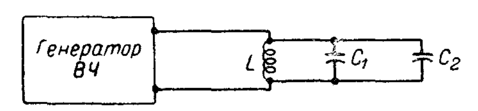


Рис. 4-13. Метод подстановки при измерении ТКЕ конденсаторов.

б) по спецификации MIL-C-20 допустимое отклонение ±0,025 *пф* при емкости конденсатора более 100 *пф*, а допустимые колебания температуры на каждой температурной ступени от 0 до —2° С, при 25° С — от 0 до +2° С.

Измерительное оборудование должно иметь бо́льшую точность. Определенные трудности наблюдаются при измерении конденсаторов с очень малой емкостью, особенно до 10 *пф*. Современное измерительное оборудование дает возможность определять температурное изменение емкости в интервале температур от —55 до +125° С с погрешностью не более 0,015 *пф*. К аппаратуре для измерения ТКЕ предъявляются раздельно электрические и тепловые требования. Основное при этом измерении то, что измерять изменение емкости конденсатора надо тогда, когда его температура изменяется на строго известную величину. Хотя для этого используют и мостовые методы измерения, но наиболее распространен метод резонансного контура.

Резонансный контур является колебательным контуром лампового генератора (рис. 4-13). Изменение емкости испытуемого конденсатора C_1 на величину ΔC_1 может быть выражено или в виде соответствующего изменения частоты гене-

ратора, или в виде изменения емкости параллельно подключенного конденсатора C_2, обеспечивающего постоянство частоты. Обычно применяют метод замены конденсатора C_1 конденсатором C_2 с помощью переключателя и подбора значения емкости C_2, обеспечивающего то же значение частоты, которому соответствовал конденсатор C_1. В этом случае $C_1 = C_2$. Измерение повторяют при различных температурах. Схема измерительной установки такого типа приведена на рис. 4-14.

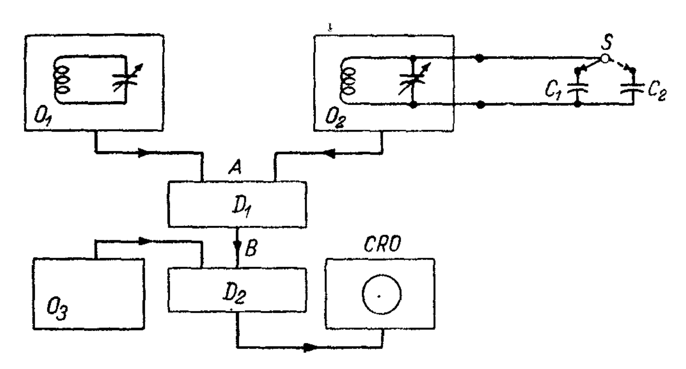


Рис. 4-14. Схема установки для измерения ТКЕ конденсаторов.

O_1 — первый генератор высокой частоты; O_2 — второй генератор высокой частоты; D_1 — первый демодулятор; D_2 — второй демодулятор; O_3 — генератор звуковой частоты (1 *кгц*); S — переключатель; CRO — катодный осциллограф.

Выходные сигналы двух генераторов (O_1 и O_2) смешиваются в демодуляторе A, результирующий сигнал выпрямляется, и в демодуляторе B получаем сигнал с частотой, равной разности двух исходных частот. Генератор O_2 может работать на частоте измерения (обычно равной 1 *Мгц*), а генератор O_1 настраивают на частоту, несколько отличную от частоты генератора O_2, для создания биений в демодуляторе B. Полученные биения смешиваются через демодулятор с выходным сигналом генератора стабильной частоты 1000 *гц*, после чего подаются на катодный осциллограф.

Описанным способом при исходной частоте 1 *Мгц* можно обнаружить ее изменение на величину порядка 2—3 *гц*, т. е. измерить относительное изменение частоты генератора O_2 порядка $(2 \div 3) \cdot 10^{-6}$.

Исследуемый конденсатор помещают в термостат и подключают к контуру генератора O_2. Частоту генератора O_1 регулируют таким образом, чтобы на катодном осциллографе получить нулевые биения. После измерения испытуемый конденсатор заменяют образцовым конденсатором с микрометрической настройкой. Регулированием емкости образцового конденсатора вновь добиваются получения нулевых биений. Термостат нагревают, например, до 65° С и процесс регулирования и измерения повторяют. При этом получают новый отсчет емкости образцового конденсатора. Разность двух отсчетов по образцовому конденсатору равна температурному изменению емкости испытуемого конденсатора, и если точно измерить повышение температуры конденсатора, то можно подсчитать величину температурного коэффициента емкости.

В соответствии с военным стандартом ТКЕ конденсаторов необходимо измерять как при крайних рабочих температурах, так и в ряде промежуточных точек. Измеряют и записывают емкость при комнатной температуре. Затем конденсатор выдерживают при низкой температуре, например —55° С или другой, предусмотренной стандартом. Если при данной температуре два последовательных измерения с интервалом в 5 *мин* не покажут изменения емкости, то эту величину емкости конденсатора записывают. Емкость измеряют при частоте 1 *Мгц*. Измерения повторяют при семи — девяти температурах, перекрывая весь предусмотренный стандартом диапазон от —55° С до наивысшей температуры испытания. Температурный коэффициент емкости рассчитывают по формуле

$$\alpha = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (t_2 - t_1)} \, (\text{град}^{-1}),$$

где C_1 — емкость при температуре 25° С;

C_2 — емкость при температуре испытания;

t_1 — комнатная температура (+25° С);

t_2 — температура испытания.

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЕМКОСТИ ПЕРЕМЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Для измерения емкости переменных конденсаторов используют те же описанные выше приборы, что и для измерения емкости постоянных конденсаторов. Обычно емкость измеряют при установке ротора на 0 и на 180°,

хотя иногда требуется измерение при большем числе точек на 0, 15, 35, 70, 105, 140 и 180° (в зависимости от закона изменения емкости с углом поворота). Температурный коэффициент емкости также измеряют способами, подобными описанным выше для постоянных конденсаторов. Переменные конденсаторы имеют относительно большую массу, поэтому необходимо особенно следить за их прогревом до заданной температуры. На рис. 4-15 показаны типичные результаты испытания переменного конденсатора,

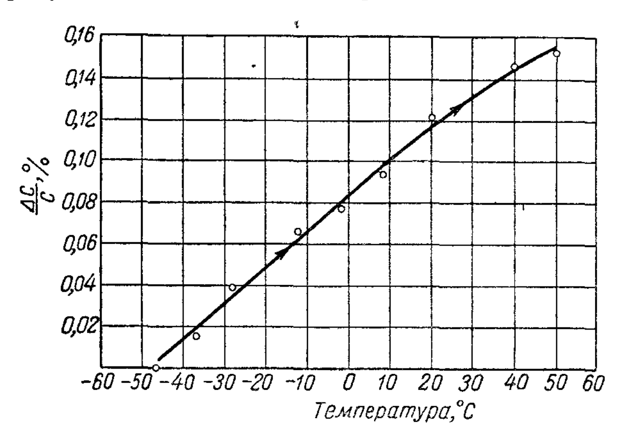


Рис. 4-15. Изменение емкости воздушного переменного конденсатора при изменении его температуры в пределах ±50° С.

применяемого в радиоприемниках. Емкость конденсатора 2—256 *пф*, испытание проведено для пределов изменения температуры ±50° С. Для переменных конденсаторов весьма важное значение имеют линейность температурной зависимости емкости, отсутствие необратимых изменений и хорошая воспроизводимость результатов циклических испытаний.

Линейность проверяют при определении зависимости емкости от температуры, используя относительно малый интервал температур. Для проверки стабильности конденсаторов в условиях циклического воздействия температур проводят повторные измерения емкости при комнатной температуре и крайних значениях рабочей температуры. Пример поведения конденсатора при таком испытании приведен на рис. 4-16. Измерение производилось при нагреве от +30 до +70° С и при охлаждении от +30 до —30° С.

Конденсатор выдерживают при температуре испытания не менее получаса. Выдержка необходима для устранения

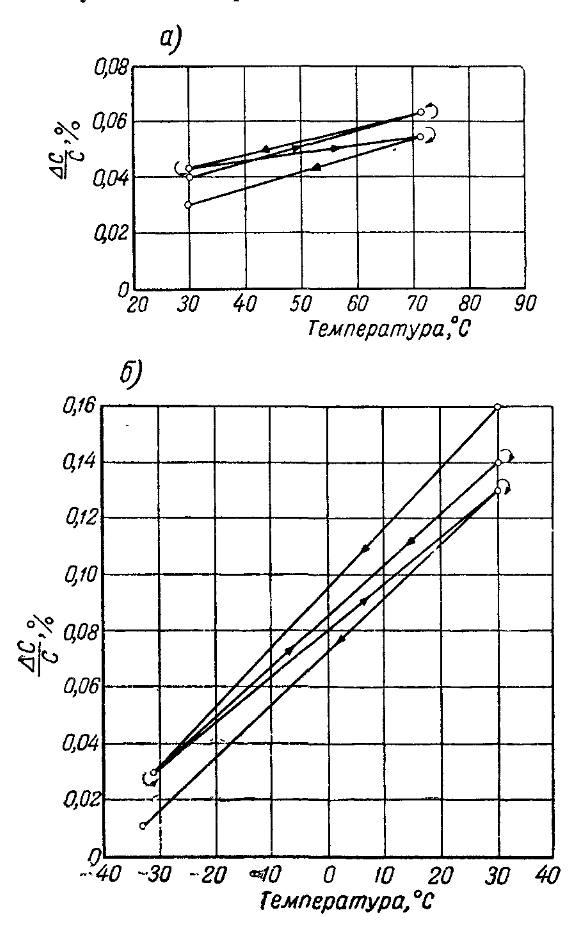


Рис. 4-16. Циклическое изменение емкости воздушного переменного конденсатора при его испытании в области повышенных (*а*) и в области пониженных (*б*) температур.

возможных изменений емкости в процессе измерения в результате воздействия механических напряжений, возникающих из-за различного коэффициента линейного расширения в разных частях конденсатора. В испытательную камеру

следует помещать некоторое количество силикагеля, чтобы исключить возможность повышения влажности в процессе измерения при низких температурах.

Многие конденсаторы обнаруживают необратимое изменение характеристик после первых двух или трех циклов. В таких случаях испытания следует повторять до получения постоянных результатов после нескольких циклов. Нециклическое поведение может быть обусловлено внутренним изменением в твердом диэлектрике или смещением электродов из-за неравномерного расширения или сжатия.

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ ПОДСТРОЕЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ (ТРИММЕРОВ)

Большие трудности, особенно при радиочастотах, возникают в случае измерения малых изменений емкости, которое характерно при испытании подстроечных конденсаторов. Например, при емкости конденсатора 30 *пф* в предположении, что изменение емкости на $1 \cdot 10^{5}$ будет уже влиять на стабильность контура, мы приходим к необходимости измерить изменение емкости порядка 0,0003 *пф*. Это требует применения аппаратуры с исключительно высокой точностью и стабильностью. Обычно используют резонансные методы измерения. Блок-схема типичной измерительной установки приведена на рис. 4-17.

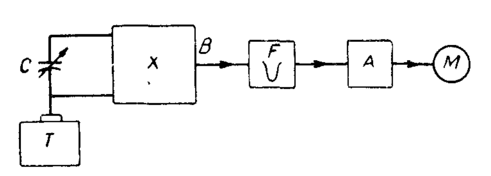


Рис. 4-17. Схема установки для определения ТКЕ подстроечных конденсаторов малой емкости.

Испытуемый конденсатор C присоединен к настроенному контуру. Этот контур состоит из двух точно подогнанных высокочастотных генераторов, выходные зажимы которых соединены в демодуляторе; акустическая частота биений этих генераторов появляется в B. Этот выходной сигнал подается к настроенному усилителю — детектору, состоящему из фильтра F с острым резонансом, усилителя A и детекторного прибора M. Частота колебаний в B подгоняется до совпадения с резонансной частотой фильтра F. Изменение емкости конденсатора C вызовет соответствующее изменение частоты биений, а отклонение измерителя вы-

ходного сигнала уменьшится в связи с тем, что возрастет затухание в фильтре. Это снижение может служить количественным показателем изменения емкости C.

Для обеспечения максимальной чувствительности частота генератора должна быть по возможности выше. Емкость C должна составлять основную часть емкости контура, чтобы давать максимальное изменение частоты биений при заданном изменении емкости C.

Резонансная частота фильтра должна быть возможно более низкой, чтобы обеспечить наибольшее изменение затухания при заданном изменении частоты.

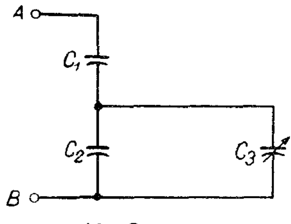


Рис. 4-18. Схема градуировки при работе методом замещения.

Практический предел чувствительности определяется стабильностью, присущей данной аппаратуре. Если генератор настроен на частоту 4 *Мгц*, а фильтр на 120 *гц*, что соответствует максимальной чувствительности, то можно обнаружить изменение емкости порядка $1 \cdot 10^{-6}$. Детекторный прибор градуируют путем замещения конденсатора C емкостью, которую можно изменять на известную величину (рис. 4-18).

Если емкость конденсатора C_1 приблизительно равна емкости испытуемого образца, а емкость C_2 относительно велика, то очень небольшое изменение общей емкости между точками A и B может быть скомпенсировано изменением C_3, которое оказывается достаточно большим для его удобного механического осуществления. Значения C_2 могут быть выбраны с таким расчетом, чтобы получить изменения общей емкости, соответственно равные $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-5}$ или $1 \cdot 10^{-6}$. Для построения кривой зависимости емкости от угла поворота емкость измеряют при разных угловых положениях ротора и полученные результаты наносят на график в виде точек. Механическая точность и стабильность измерительной аппаратуры должны быть весьма высокими.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ
КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

ГЛАВА ПЯТАЯ
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

В настоящее время в США в общем употреблении имеются два основных набора спецификаций: 1) разработанные Министерством обороны (военные серии) на детали для военного оборудования; 2) разработанные Объединением электронной промышленности (EIA) на радиодетали широкого применения (EIA ранее называлось Объединением производителей радио-, электронного и телевизионного оборудования — RETMA). Объединение авиапромышленности (AIA) и Международная электротехническая комиссия (IEC) также выпустили небольшое количество спецификаций, которые можно использовать.

СПЕЦИФИКАЦИИ США

Стандарты Министерства обороны

Министерством обороны опубликованы следующие спецификации на конденсаторы постоянной емкости:

MIL-C-5: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные.

MIL-C-20: Конденсаторы постоянной емкости, керамические (термокомпенсирующие).

MIL-C-25: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, постоянного напряжения (герметизированные, в металлических корпусах).

MIL-C-62: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические (постоянного напряжения, алюминиевые, сухие, полярные).

MIL-C-91a: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, в неметаллических корпусах.

MIL-C-3871: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические (переменного напряжения, сухие, неполярные).

MIL-C-3965: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические (танталовые).

MIL-C-10950: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные, «пуговичного» типа.

MIL-C-11015: Конденсаторы постоянной емкости, керамические (общего применения).

MIL-C-11272: Конденсаторы постоянной емкости, стеклянные.

MIL-C-11693: Конденсаторы проходные, для подавления радиопомех, бумажные, переменного и постоянного напряжения (герметизированные, в металлических корпусах).

MIL-C-14157: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, постоянного напряжения, высоконадежные (герметизированные, в металлических корпусах).

MIL-C-18312: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, металлизированные, постоянного напряжения, герметизированные, в металлических корпусах.

MIL-C-19978: Конденсаторы постоянной емкости, пленочные.

MIL-C-21720: Конденсаторы постоянной емкости, танталовые, с твердым электролитом.

Спецификации EIA

Ассоциацией электронной промышленности опубликованы следующие спецификации:

REC-107A: Конденсаторы постоянной емкости, керамические, классы 1 и 2.

RS-165: Конденсаторы постоянной емкости, керамические, классы 1 и 2 (рабочее напряжение от 1 до 75 *кв*).

RS-171: Конденсаторы постоянной емкости, керамические, высокого напряжения, класс 2.

RS-154: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические, сухие, общего применения.

TR-140: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические, сухие, повышенного качества.

RS-153: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные, опрессованные.

TR-109: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные, залитые компаундом.

TR-113A: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, в металлических корпусах, для постоянного напряжения.

RS-164: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, без металлических корпусов, цилиндрические.

Спецификации AIA

Следующие спецификации для авиационной промышленности опубликованы Ассоциацией авиапромышленности:

NAS 700: Конденсаторы постоянной емкости, многопластинчатые, миниатюрные.

NAS 701: Конденсаторы постоянной емкости, фольговые, намотанные, миниатюрные.

Спецификации IEC (МЭК)

Международная электротехническая комиссия (МЭК) является международной организацией с постоянным пребыванием в Швейцарии; через агентства по стандартизации в различных странах (в США — Американская ассоциация по стандартизации — ASA) она координирует составление и выпуск промышленных норм на радиодетали. Этой Комиссией выпущена одна спецификация на конденсаторы: «Бумажные конденсаторы постоянной емкости постоянного напряжения», Публикация 80, 1956. Дополнительно разрабатываются следующие новые спецификации на конденсаторы: «Цветной код для керамических конденсаторов», «Электролитические конденсаторы», «Керамические конденсаторы типов 1А и 1В» и «Алюминиевые электролитические конденсаторы общего применения».

АНГЛИЙСКИЕ СПЕЦИФИКАЦИИ

Английские спецификации на конденсаторы постоянной емкости также могут представить интерес. В настоящее время в Англии имеются две основные группы таких спецификаций: разработанные Комитетом стандартизации ра-

диодеталей (RCSC) для использования в военной технике (эквивалентны американским военным стандартам MIL) и разработанные Советом радиопромышленности (RIC) для промышленности коммерческой электроники (эквивалентны американским документам EIA).

Спецификации RCSC

RCG 130:	Руководство по конденсаторам постоянной емкости.
RCG 131:	Бумажные конденсаторы постоянной емкости постоянного напряжения.
DEF 5132:	Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные.
DEF 5133-1:	Конденсаторы постоянной емкости, керамические, с нормализованным температурным коэффициентом емкости (нормальная диэлектрическая проницаемость).
DEF 5133-2:	Конденсаторы постоянной емкости, керамические (из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью).
RCS 134A:	Конденсаторы постоянной емкости, электролитические (непригодны для работы при температуре ниже —30° С).
RCS 134B:	Конденсаторы постоянной емкости, электролитические (танталовые).
RCS 136:	Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, металлобумажные, постоянного напряжения.
RCS 137:	Конденсаторы постоянной емкости, пленочные, постоянного напряжения, для работы только в интервале температур от —30 до +60° С.
RCL 131:	Перечень стандартных типов конденсаторов постоянной емкости, бумажных.
DEF 5135:	Конденсаторы постоянной емкости, стеклоэмалевые и стеклянные.
RCL 134A:	Перечень стандартных типов электролитических конденсаторов постоянной емкости (непригодны для работы при температуре ниже — 30° С).
RCL 134B:	Перечень стандартных типов конденсаторов постоянной емкости, электролитических (танталовых).

RCL 136: Перечень стандартных типов конденсаторов постоянной емкости, металлобумажных.

RCL 137: Перечень стандартных типов конденсаторов постоянной емкости, пленочных (для работы при температуре от —30 до +60° С).

Спецификации RIC

RIC/131: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, цилиндрические, фольговые.

RIC/132: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные, многопластинчатые, фольговые.

RIC/133: Конденсаторы постоянной емкости, керамические, сорт 1.

RIC/134: Конденсаторы постоянной емкости, электролитические.

RIC/136: Конденсаторы постоянной емкости, бумажные, металлобумажные, цилиндрические.

RIC/137: Конденсаторы постоянной емкости, слюдяные, металлизированные.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

На рис. 5-1 приведены условные обозначения конденсаторов, применяемые в гражданской и военной документации

Рис. 5-1. Условные обозначения конденсаторов постоянной емкости: *а* — общее обозначение; если необходимо идентифицировать обкладки конденсатора, то закругленный отрезок на обозначении соответствует внешней обкладке в бумажном или керамическом конденсаторе, катодной обкладке в электролитическом конденсаторе и низкопотенциальной обкладке в проходном конденсаторе; *б* — экранированный конденсатор; *в* — шунтовой конденсатор; *г* — проходной конденсатор (оконечный конденсатор, обычно применяемый в устройствах с коаксиальным кабелем или волноводом); *д* — сериесный конденсатор с открытым выходом; *е* — сериесный конденсатор при закороченном выходе.

в соответствии с MIL-STD-15A «Условные обозначения в электротехнике и электронной технике».

ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫЕ ИЛИ СТАНДАРТНЫЕ ТИПЫ И ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Все типы и значения характеристик радиодеталей, которые предусматриваются военными спецификациями, являются стандартными (предпочтительными) для применения в новых разработках для отдельных или для всех военных организаций. Некоторые из этих организаций разработали дополнительные документы, содержащие ограничения в части использования типов и величин, указанных в стандартах. Наиболее значительной среди этих документов является спецификация на радиодетали Военно-морского министерства MIL-STD-242. Современная программа стандартизации военных министерств, осуществляемая под руководством помощника министра обороны по вопросам научных исследований и техники, направлена на разработку и выпуск норм на все детали электронного оборудования, которые можно рассматривать как стандартные (предпочтительные) для новых разработок всех трех военных министерств.

Стандартные значения характеристик небольших конденсаторов постоянной емкости, исключая нецилиндрические бумажные и электролитические, согласно или военным или EIA спецификациям должны соответствовать ряду предпочтительных значений, указанному в общем стандарте GEN-102 «Предпочтительные величины», разработанном EIA.

В связи с тем что электронная промышленность потребляет радиодетали с допускаемым отклонением от номинала ±5, ±10 и ±20%, Объединение электронной промышленности (EIA) приняло серию предпочтительных номинальных величин, основанных на использовании соотношений 24 : 10, 12 : 10, 6 : 10.

ЦВЕТНЫЕ КОДЫ

Цвета для цветных кодов

В том случае, когда в военном стандарте на радиодетали нет специальных указаний, цвета для цветного кода выбирают в соответствии со спецификацией MIL-STD-174 «Цвета для маркировки радиодеталей». Цвета для маркировки, предусмотренной EIA, указаны в документе GEN-102.

Бумажные конденсаторы

Маркировка бумажных конденсаторов, изготовленных по спецификациям Военно-морского министерства MIL-C-25, MIL-C-91, MIL-C-14157 и MIL-C-18312, должна содержать

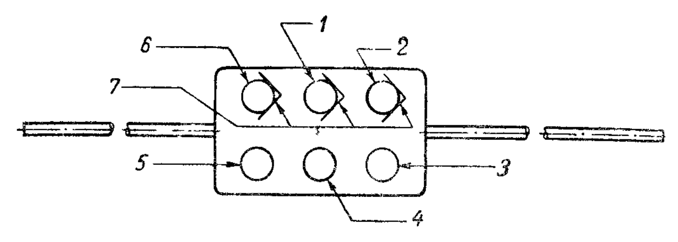


Рис. 5-2. Маркировка цветным кодом для бумажных опрессованных конденсаторов по стандарту MIL-C-91.

1 — первая значащая цифра; *2* — вторая значащая цифра; *3* — множитель; *4* — допуск по емкости; *5* — группа (тип пропитки); *6* — серебряная точка (знак военного стандарта); *7* — индикатор.

обозначение типа конструкции, емкости, номинального напряжения и фирменный знак. Если не хватит места, то емкость и номинальное напряжение могут быть опущены. В табл. 5-1 приведен цветной код по MIL-C-91.

Таблица 5-1

Цветной код для опрессованных бумажных конденсаторов по MIL-C-91

Цвет	Характеристика	Емкость: Первая и вторая значащие цифры	Емкость: Множитель	Допуск по емкости, %
Черный	A	0	1	±20 (M)
Коричневый	E	1	10	—
Красный	—	2	100	—
Оранжевый	—	3	1 000	±30 (N)
Желтый	—	4	10 000	—
Зеленый	—	5	—	—
Синий	—	6	—	—
Фиолетовый	—	7	—	—
Серый	—	8	—	—
Белый	—	9	—	—
Серебряный	—	—	—	±10 (K)

На конденсаторах широкого применения обычно маркируют емкость, номинальное напряжение, тип и фирменный знак. Опрессованные бумажные конденсаторы по MIL-C-91 могут быть маркированы цветным кодом, как это показано на рис. 5-2, если недостаток места не позволит привести полную маркировку, описанную выше. Цветные знаки наносят в виде шести точек, расположенных в два ряда по три точки в каждом с указателем, поясняющим, в каком порядке необходимо читать эти знаки.

Слюдяные конденсаторы

Слюдяные опрессованные конденсаторы с проволочными аксиальными выводами, выпускаемые по MIL-C-5, марки-

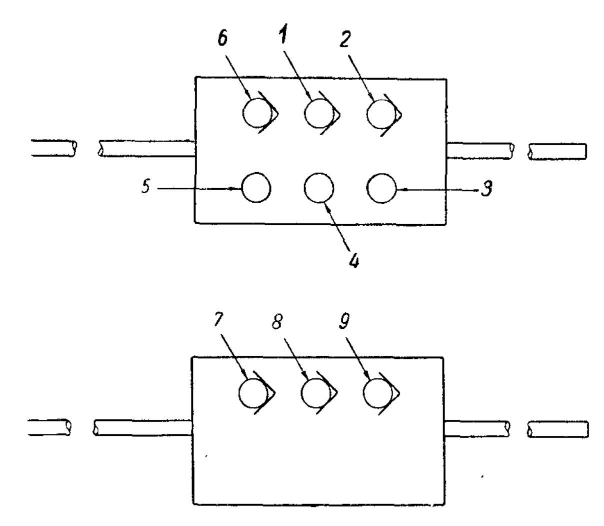


Рис. 5-3. Маркировка цветным кодом слюдяных опрессованных конденсаторов по стандарту MIL-C-5.

1 — первая значащая цифра; *2* — вторая значащая цифра; *3* — множитель; *4* — допуск по емкости; *5* — группа (по ТКЕ); *6* — черная точка (знак военного стандарта); *7* — рабочее напряжение постоянного тока; *8* — диапазон рабочих температур; *9* — группа виброустойчивости.

руют с указанием типа конструкции, емкости, рабочего напряжения и названия фирмы изготовителя или фирменного знака. Для обозначения может быть использован и цветной код.

Таблица 5-2

Цветной код для слюдяных конденсаторов по MIL-C-5

Цвет	Характеристика	Емкость		Допуск (±), %	$U_{раб}$, постоянный ток, *в*	Пределы температуры, °С
		Первая и вторая цифры	Множитель			
Черный	—	0	1	—	—	—55±70
Коричневый	B	1	10	—	—	—
Красный	C	2	100	2 (G)	–	—55±85
Оранжевый	D	3	1000	—	300	—
Желтый	E	4	—	—	–	55±125
Зеленый	F	5	—	5 (J)	500	—
Синий	—	6	—	—	—	-55±150
Фиолетовый	—	7	—	—	—	—
Серый	—	8	—	—	—	—
Белый	—	9	—	–	—	—
Золотой	—	—	0,1	—	—	—
Серебряный	—	—	—	10 (K)	—	—

Примечания: 1. Характеристика — буква, отмечающая стабильность емкости при изменениях температуры.

2. Обозначение класса по вибрации: черный цвет — от 10 до 55 *гц* и желтый цвет — от 100 до 2000 *гц*.

Коммерческие типы конденсаторов в соответствии со спецификацией RS-153 (EIA) маркируют тем же самым цветным кодом (только первые шесть точек).

Военный цветной код на слюдяные конденсаторы предусматривает девять точек, группируемых в три ряда по три точки в каждом; индикатор в виде стрелки указывает, в каком направлении необходимо читать знаки (рис. 5-3). При этом используется цветной код по табл. 5-2.

Слюдяные конденсаторы пуговичного типа маркируют по MIL-C-10950. Цветные знаки располагают в виде шести точек по кольцу в направлении часовой стрелки, как показано на рис. 5-4. Используют цветной код, приведенный в табл. 5-2. Конденсаторы этого типа выпускаются только групп C и D.

Рис. 5-4. Маркировка цветным кодом слюдяных пуговичных конденсаторов по стандарту MIL-C-10950.

1 — первая значащая цифра; *2* — вторая значащая цифра; *3* — множитель; *4* — допуск по емкости; *5* — группа (по ТКЕ); *6* — черный знак военного стандарта.

Стеклянные конденсаторы

Стеклянные конденсаторы военного применения в соответствии с требованиями MIL-C-11272 маркируют или с указанием типовых обозначений или цветным кодом. Этот код такой же, что и для слюдяных опрессованных конденсаторов (только первые шесть точек). Эти конденсаторы выпускаются только группы С.

Керамические конденсаторы

По спецификации MIL-C-20 на керамических конденсаторах (термокомпенсирующих) обозначают тип конструкции и допуск по емкости или маркируют их цветным кодом, нанося пять полос, как показано на рис. 5-5. Стандартный

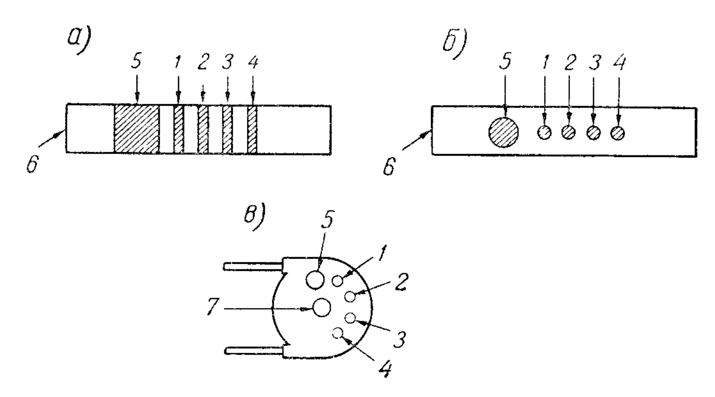


Рис. 5-5. Маркировка цветным кодом керамических конденсаторов по стандарту MIL-C-20: *а* — трубка с аксиальными выводами; *б* — трубка с радиальными выводами; *в* — диск.

1 — первая значащая цифра; *2* — вторая значащая цифра; *3* — множитель; *4* — допуск по емкости; *5* — группа (по ТКЕ); *6* — вывод от внутренней обкладки; *7* — знак военного стандарта.

цветной код приведен в табл. 5-3. Для коммерческих конденсаторов, выпускаемых по спецификации RS-165 (EIA), используют тот же цветной код.

Конденсаторы широкого потребления (дисковые или трубчатые) по MIL-C-11015 маркируют с указанием типа конструкции, группы емкости и названия фирмы или фирменного знака. Если место для надписи ограничено, то

применяют цветной код, как показано на рис. 5-6. Стандартный цветной код приведен в табл. 5-4.

Таблица 5-3

Цветной код для керамических конденсаторов по MIL-C-20

Цвет	Характеристика (группа по ТКЕ)	Номинальная емкость, *пф*		Допуск по емкости	
		Первая и вторая значащие цифры	множитель	для емкостей более 10 *пф*, %	для емкостей 10 *пф* и менее, %
Черный	C (0)	0	1	—	±2 (G)
Коричневый	H (—30)	1	10	±1 (F)	—
Красный	L (—80)	2	100	±2 (G)	±0,25 (C)
Оранжевый	P (—150)	3	1000	—	—
Желтый	R (—220)	4	—	—	—
Зеленый	S (—330)	5	—	±5 (J)	±0,5 (D)
Синий	T (—470)	6	—	—	—
Фиолетовый	U (—750)	7	—	—	—
Серый	—	8	0,04	—	—
Белый	—	9	0,10	±10 (K)	±1 (F)
Золотой	A (+100)	—	—	—	—

Рабочий интервал температур и температурная зависимость напряжения обозначены двумя буквами. Первая

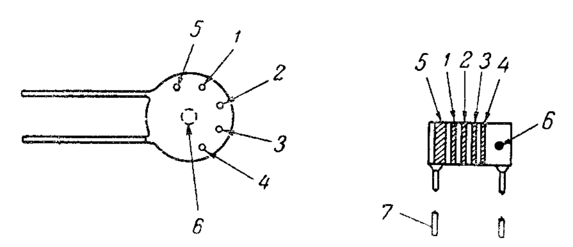


Рис. 5-6. Маркировка цветным кодом малогабаритных дисковых и трубчатых керамических конденсаторов.

1 — первая значащая цифра; *2* — вторая значащая цифра; *3* — множитель; *4* — допуск по емкости; *5* — группа (по ТКЕ); *6* — знак военного стандарта; *7* — вывод от внутренней обкладки.

буква указывает на диапазон рабочих температур, вторая — предельное напряжение или допустимое изменение емкости при определенной температуре как при подаче напряжения на конденсатор, так и без напряжения.

Таблица 5-4

Цветной код для керамических конденсаторов по MIL-C-11015

Цвет	Интервал температур и температурная зависимость напряжения	Номинальная емкость		Допуск по емкости, %
		Значащие цифры	Множитель	
Черный	—	0	1	±20 (M)
Коричневый	*AW*	1	10	±10 (K)
Красный	*AX*	2	100	
Оранжевый	—	3	1000	
Желтый	—	4	—	+80 (X) −20
Зеленый	*CZ*	5		
Синий	—	6		
Фиолетовый	—	7		
Серый	—	8		
Белый		9		

Множитель — коэффициент, на который умножаются две значащие цифры для получения номинальной емкости.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

БУМАЖНЫЕ И МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В этой главе будут рассмотрены более подробно конструкция и режим работы различных типов бумажных конденсаторов (фольговых пропитанных, металлизированных, одноленточных).

БУМАЖНЫЕ ПРОПИТАННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Бумажные пропитанные конденсаторы постоянной емкости, цилиндрические, изготовляют намоткой из лент бумаги, разделенных металлическими электродами. В качестве электродов обычно используют алюминиевую фольгу, но можно применять и оловянную или медную; бумагу — специальную конденсаторную. Намотанные конденсаторные секции тщательно сушат и пропитывают воскообразным веществом или маслом. В зависимости от конструкции выводов различают два типа конденсаторов: с вкладными

выводами и с выступающей фольгой (рис. 6-1). На рис. 6-2 показана типичная конструкция цилиндрических конденсаторов в металлических корпусах.

Для намотки конденсаторов используют бумагу толщиной от 5 до 25 *мк* и фольгу толщиной 6,25 *мк*. Бумагу изготовляют обычно из растительных волокон, которые химически обрабатывают в крепкой щелочи и получают из них целлюлозу, сохраняющую волокнистую форму. Полученную после размола в роллах массу превращают в бумагу на бумагоделательных машинах. Всякая бумага содержит проводящие частицы угольной пыли, которые могут пронизывать бумажный лист насквозь, особенно при такой малой толщине, как у конденсаторной бумаги. По этой причине в бумажных конденсаторах между электродами применяют не менее двух слоев бумаги, а иногда и более в соответствии с рабочим напряжением и другими характеристиками изготовляемых конденсаторов. Рабочая напряженность поля в бумажном пропитанном диэлектрике составляет 15—25 *кв/мм*. Конденсаторы работают примерно при шестикратном запасе электрической прочности, пробивная напряженность лежит около 150 *кв/мм*. Напряжение на каждой из последовательно включенных конденсаторных секций не должно превышать 3 *кв*.

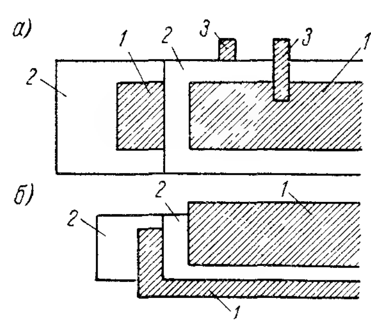


Рис. 6-1. Два типа намотки бумажных конденсаторов: *а* — с вкладными контактами (скрытая фольга); *б* — с выступающей фольгой.

1 — фольга; *2* — бумага; *3* — вкладной контакт.

Конденсаторная бумага гигроскопична и в состоянии поставки содержит от 5 до 7% влажности. После сушки секции подвергают вакуумной пропитке синтетическими жидкостями, минеральными маслами, воскообразными веществами или вазелином, чтобы заполнить пустоты, остающиеся в бумаге между волокнами целлюлозы. Эти пустоты, или воздушные пространства, включены последовательно с целлюлозой, поэтому пропитка приводит к повышению диэлектрической проницаемости, угла потерь и электрической прочности диэлектрика.

Если для пропитки применяют пропиточную массу с высокой диэлектрической проницаемостью, например хлорнафталин или хлордифенил, то конденсаторы имеют

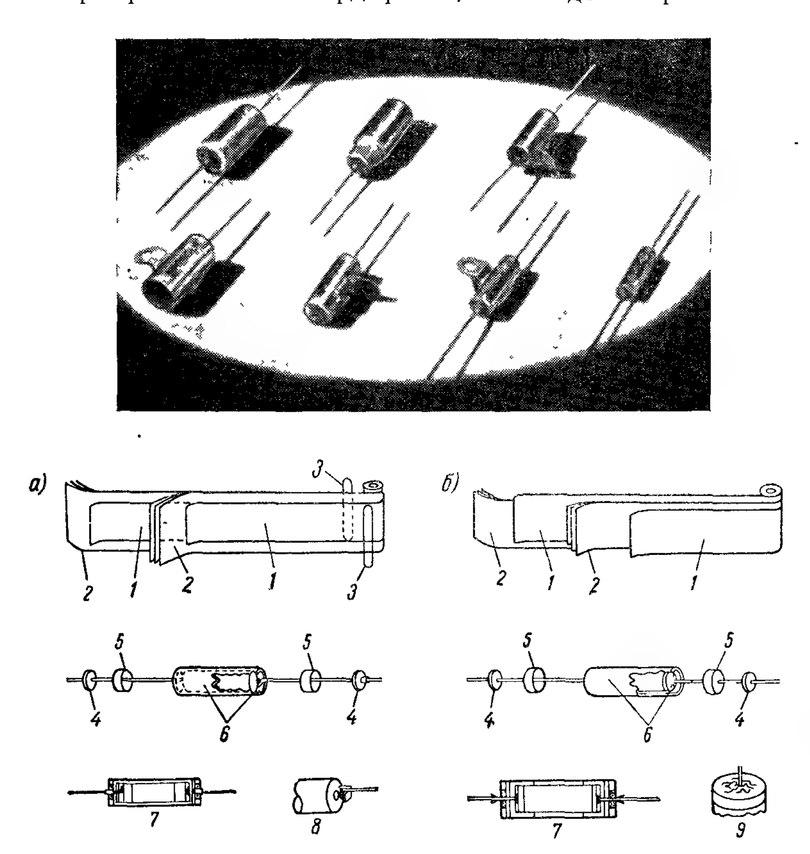


Рис. 6-2. Конструкция бумажного конденсатора цилиндрического типа (фирма «Спрэг электрик К°»): *а* — конструкция с вкладными контактами; *б* — конструкция с выступающей фольгой.

1 — фольга; *2* — слои бумаги; *3* — вкладной контакт; *4* — стеклянный изолятор с арматурой из ковара; *5* — изолирующий колпачок из кабельной бумаги; *6* — секция конденсатора с изоляцией от корпуса; *7* — разрез готового конденсатора; *8* — вкладной контакт, припаянный к проволочному выводу; *9* — вывод, припаянный к фольге, выступающей с торца секции.

меньший удельный объем, чем в случае пропитки минеральным маслом. Хлорнафталином пропитывают конденсаторы на напряжение 200—300 *в* для работы при температуре

окружающей среды до 55° С. При более высоких температурах бумага может быть разрушена соляной кислотой, образующейся из водорода, выделяемого при электролизе, и хлора, отщепляемого от пропиточной массы. В Англии для предотвращения подобного разрушения в хлорированные пропиточные материалы вводят стабилизаторы, способные присоединять водород, например азобензол.

Результаты многочисленных испытаний показали, что длительный срок службы конденсаторов при постоянном напряжении и высокой температуре, который ранее удавалось обеспечивать только при пропитке неполярной массой — вазелином, можно получать и при пропитке хлорнафталином, если добавлять к нему 5% азобензола.

Емкость конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, зависит от частоты и температуры. Срок службы конденсаторов этого типа при повышенных температурах (90° С) был значительно увеличен в результате работы, проделанной Мак-Лином и Эджертоном. Увеличение срока службы было достигнуто за счет того, что до пропитки конденсаторные секции в течение многих часов выдерживались при высокой температуре в воздушной среде, а в хлордифенил добавлялось небольшое количество стабилизатора — антрахинона (0,5%).

Весьма существенно тщательное поддержание чистоты в процессе изготовления конденсаторов этого типа, так как хлордифенил — активный растворитель и может абсорбировать загрязнения из таких материалов, как резина, а также может взаимодействовать с медью, если последняя не защищена надежным лужением.

Касторовое масло можно использовать для пропитки в тех случаях, когда ограничен температурный интервал (от —25 до +65° С) или допустимо значительное изменение емкости при низких температурах. Диэлектрическая проницаемость касторового масла при низкой частоте относительно высока, поэтому удельный объем конденсатора будет меньше, чем при пропитке минеральным маслом.

Минеральное масло обычно используют в диапазоне температур от —55 до +105° С, когда необходима стабильность емкости при колебаниях температуры. При более высоких температурах (до 125° С) применяют кремнийорганические жидкости, полиэфиры или полиизобутилены. Конденсаторы, пропитанные этими материалами, имеют хорошую стабильность емкости при изменении температуры.

Заменяя один слой бумаги пленкой из полиэтилентерефталата, получают конденсаторы с повышенным сопротивлением изоляции и большим сроком службы. Этот тип бумажного конденсатора с комбинированным диэлектриком весьма перспективен.

Общие характеристики бумажных пропитанных конденсаторов

На окончательное значение емкости изготовленного конденсатора влияют следующие технологические факторы: толщина бумаги (возможные колебания $\pm 10\%$), плотность бумаги, гладкость поверхности бумаги, ширина фольги, натяжение при намотке, характеристики использованной пропиточной массы.

Бумажные пропитанные конденсаторы обычно изготовляют с допуском по емкости не менее $\pm 10\%$.

Пробивное напряжение. Имеется большое различие между пробивным напряжением на постоянном и переменном токе. Условия работы при переменном напряжении будут разобраны ниже.

Максимальное постоянное или переменное напряжение, которое может быть подано на конденсатор, снижается при повышении температуры. При 125° С оно может составлять только половину пробивного напряжения при комнатной температуре. Обычно потери бумажных пропитанных конденсаторов увеличиваются с повышением напряжения, в то время как пробивное напряжение уменьшается с повышением температуры. Пробивная напряженность $E_{пр}$ конденсаторов, пропитанных воскообразным веществом, маслом или вазелином, зависит также в сильной степени от времени приложения напряжения. Если скорость возрастания напряжения равна 50 *в/мин*, то пробивная напряженность конденсаторной бумаги хорошего качества при комнатной температуре составляет около 200 *кв/мм* (при постоянном напряжении), при 50° С — порядка 150 *кв/мм* и при 80° С — примерно 125 *кв/мм*. На переменном токе амплитудное значение пробивного напряжения будет несколько меньшим. Если неизменное напряжение постоянного или переменного тока подается на конденсатор в течение 24 *ч* при комнатной температуре, то пробивная напряженность составляет около 50 *кв/мм*.

Температурный коэффициент емкости. Температурный коэффициент емкости конденсатора в значительной степени

зависит от его размеров, конструкции и типа использованной пропиточной массы. Так как емкость бумажных конденсаторов при низких температурах значительно изменяется, то температурную стабильность этих конденсаторов характеризуют выраженным в процентах отклонением емкости от ее значения, измеренного при 25° С, а величиной температурного коэффициента емкости не пользуются. Если конденсаторы рассчитаны для работы в ограниченном интервале температур, то иногда используют и величину температурного коэффициента емкости. Цилиндрические секции, намотанные на жесткую втулку, — механически наиболее

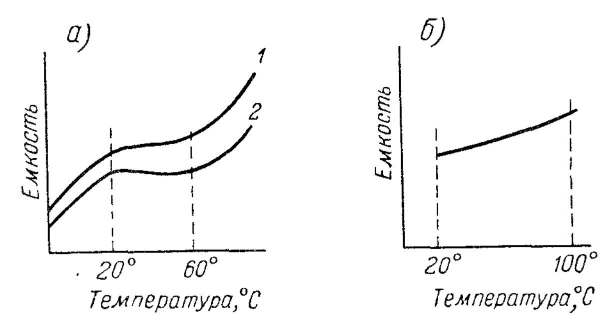


Рис. 6-3. Зависимость емкости бумажного конденсатора от температуры: *а* — цилиндрическая секция; *б* — плоско-прессованная секция.

1 — пропитка маслом; *2* — пропитка вазелином.

надежный тип, так как втулка сохраняет свою форму при колебаниях температуры. Конденсаторы плоско-прессованного типа обычно имеют более высокий ТКЕ и дают необратимое изменение емкости при циклических испытаниях. Значения температурных коэффициентов емкости этих двух типов конденсаторов могут колебаться в пределах от +100 до $+200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ при изменении температуры в узком интервале от 20 до 60° С.

Температурный коэффициент емкости зависит от типа пропиточной массы и может быть нелинейным в тех случаях, когда вязкость массы сильно изменяется с температурой. При пропитке секций минеральным маслом ТКЕ в интервале температур 20—60° С обычно положителен, а при пропитке вазелином — отрицателен. Кривые рис. 6-3 показывают типичное изменение емкости с температурой для таких конденсаторов.

Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость бумажного диэлектрика в конденсаторах, пропитанных маслом, неполярным воскообразным веществом или вазелином, равна 3,4—4,5. Секции у цилиндрических конденсаторов менее сжаты, чем у плоско-прессованных, поэтому для них имеем ε ближе к нижней границе. Существует также определенная зависимость от плотности бумаги: применяя более плотную бумагу и увеличивая сжатие секций, можно повысить диэлектрическую проницаемость до 4,5. Небольшое увеличение ε наблюдается с повышением температуры и некоторое снижение — с ростом частоты.

Коэффициент мощности или угол потерь. Коэффициент мощности конденсаторов, пропитанных маслом, неполярным воскообразным веществом или вазелином, зависит главным образом от плотности бумаги; при частоте 60 *гц* и температуре 25—65° С он лежит в пределах 0,0015—0,005. Коэффициент мощности с увеличением температуры сначала уменьшается, а затем вновь возрастает. При высоких температурах потери зависят прежде всего от наличия влаги в диэлектрике. Форма и расположение кривой температурной зависимости угла потерь изменяются с частотой. Коэффициент мощности несколько увеличивается при повышении частоты (возрастание делается резким при частотах свыше 10 *кгц*), но можно наблюдать и снижение потерь, если температура достаточно высока. Иными словами, при высоких частотах максимум коэффициента мощности проявляется при более высокой температуре.

Сопротивление изоляции и удельное объемное сопротивление диэлектрика. Сопротивление изоляции $R_{из}$ всех типов конденсаторов с бумажным диэлектриком резко падает с повышением температуры. Увеличение температуры вдвое (по отношению к нормальной) может привести к снижению $R_{из}$ в 10 раз по отношению к его первоначальной величине. Сопротивление изоляции зависит от наличия влаги и загрязнений, поэтому важное значение приобретает надежность герметизации конденсаторов. Колебание значений $R_{из}$ в 1000 раз обычно для коммерческих конденсаторов, выпускаемых разными поставщиками. При точном измерении удельного объемного сопротивления диэлектрика бумажного конденсатора надо устранять погрешность, которую может создать наличие тока поверхностной утечки. График рис. 6-4 показывает изменение удельного

объемного сопротивления с температурой. В этом случае ток проводимости в бумаге измерялся через некоторое время после приложения напряжения, когда токи абсорбции уже исчезли. Обычно практические измерения, проводимые без охранных колец и без особых предосторожностей, могут дать результат по крайней мере в 10 раз ниже, чем на рис. 6-4.

Результат некоторых измерений, показывающих изменение сопротивления изоляции типичных бумажных конденсаторов с температурой, приведен в гл. 2.

Поведение бумажных конденсаторов при переменном токе. Когда на выводы конденсатора подано переменное напряжение, металлические фольговые обкладки заряжаются попеременно то положительно, то отрицательно. Разноименно заряженные обкладки будут испытывать взаимное притяжение. В связи с этим в дополнение к электрическому появляется и механическое напряжение. При увеличении напряжения обкладки стремятся сблизиться, и емкость возрастает. Этот эффект наиболее заметен у конденсаторов, пропитанных маслом или какой-либо другой жидкостью. Слабее он проявляется при пропитке вазелином и относительно мал в случае применения вязкой или твердой пропиточной массы.

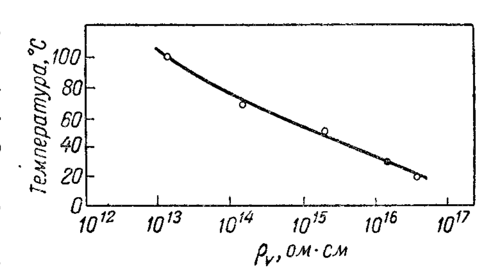


Рис. 6-4. Зависимость удельного объемного сопротивления диэлектрика бумажного конденсатора от температуры.

Максимальное амплитудное напряжение переменного тока, которое может быть приложено к цилиндрическим бумажным конденсаторам, не превышает 350 *в*. Это объясняется тем, что в пропитанной бумаге, даже после вакуумной пропитки при давлении 0,5 *мм рт. ст.* в течение 50 *ч*, всегда остаются воздушные включения. При переменном токе пузырьки воздуха ионизируются, образуется тлеющий разряд и прилегающие участки бумаги обугливаются. При переменном напряжении ионизация происходит в каждый полупериод, следовательно, она весьма опасна. При постоянном токе ионизация возникает только в момент вклю-

чения и выключения. Однако если рабочее напряжение достаточно высоко, то она может происходить и при постоянном напряжении. Существуют два возможных решения этой проблемы: необходимо или дополнительно улучшить вакуум при пропитке (что дорого), или предотвращать ионизацию, снижая напряжение, прикладываемое к воздушным включениям. Если изобразить зависимость пробивного напряжения воздуха от длины воздушного промежутка, то получим кривую Пашена (рис. 6-5).

Из рисунка видно, что существует определенное минимальное напряжение, ниже которого не может быть пробоя, независимо от размера воздушного промежутка. Для воздуха это напряжение равно 350 *в*, для неона — около 120 *в*. Тем не менее ионизация — это синоним пробоя. В воздушной среде ионизация может существовать длительно и стабильно, как, например, в случае высоковольтных линий передачи энергии. Наличие ионизации в воздушных включениях конденсатора уменьшает срок его жизни, потому что получается локальный перегрев. Поэтому при переменном токе амплитудное напряжение на конденсаторной секции не должно превышать 350 *в*. Для работы при более высоком напряжении применяется последовательное соединение секций и тщательная пропитка маслом, позволяющая устранить воздушные включения. Практически есть некоторый коэффициент запаса в связи с тем, что разряды фактически начинаются при напряжении, несколько превышающем 350 *в*.

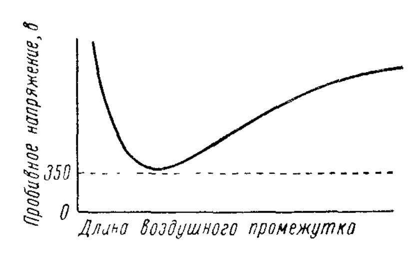


Рис. 6-5. Зависимость пробивного напряжения от длины воздушного промежутка (закон Пашена).

При повышении частоты максимальное переменное напряжение, которое способен выдержать конденсатор, снижается. Это снижение тем больше, чем выше емкость. Частично это является результатом избыточного нагрева при протекании повышенного тока при высоких частотах. Ток пропорционален произведению ωC, а следовательно, возрастает с увеличением как частоты, так и емкости. Кроме того, сказывается и более сильное разрушение диэлектрика разрядами при высоких частотах.

Поведение бумажных конденсаторов при радиочастотах. Только небольшие бумажные цилиндрические конденсаторы можно использовать при радиочастотах. Индуктивность таких конденсаторов эквивалентна индуктивности прямого отрезка медной проволоки (№ 20 по британскому сортаменту), длина которого равна длине конденсатора, включая выводные проводники. Эта индуктивность находится в пределах от 0,01 до 0,05 *мкгн*. В радиочастотных фильтрах собственную индуктивность конденсатора можно использовать для получения резонанса при некотором значении частоты. Уменьшение полного сопротивления в таких условиях показано на рис. 6-6.

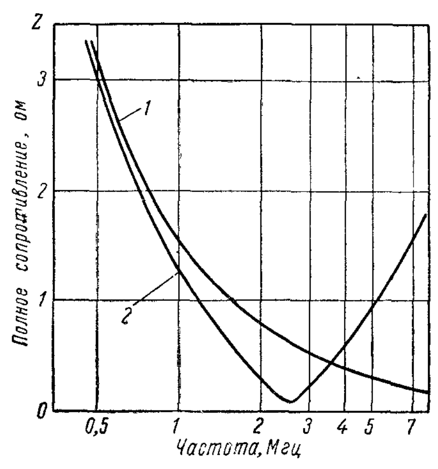


Рис. 6-6. Влияние остаточной индуктивности на полное сопротивление бумажного конденсатора емкостью 0,1 *мкф*.

1 — индуктивность равна нулю, 2 — индуктивность равна 0,04 *мкгн*.

МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

На одну сторону бумажной ленты можно нанести металл методом напыления или испарения в вакууме. Преимущество этого способа состоит в том, что электроды могут быть очень малой толщины, в результате чего удельный объем конденсатора будет меньше удельного объема нормального фольгового конденсатора. В процессе металлизации на поверхности бумаги по одному краю вдоль всей ленты оставляют узкую неметаллизированную полосу. Ширина этой полосы зависит от рабочего напряжения конденсатора.

Наиболее важным достоинством металлобумажных конденсаторов, кроме их малого размера, является свойство самовосстановления электрической прочности при небольших перенапряжениях. Если постепенно увеличивать на-

пряжение на конденсаторе, то можно отметить такое значение, при котором начнется искрение. Если напряжение поддержать постоянным при этом значении, то искрение мгновенно прекратится. Искрение (единичный пробой) происходит на участках бумаги с пониженной электрической прочностью, причем тонкий слой металла испаряется вокруг точки короткого замыкания без разрушения бумаги. Если бумага металлизирована алюминием, то при высокой температуре образуется окись алюминия, которая сама служит хорошим диэлектриком. Поэтому электрическая прочность бумажного диэлектрика будет восстановлена почти мгновенно. Далее можно еще повысить напряжение до более высокого значения, когда снова произойдут пробой и самовосстановление. Наконец, будет достигнута такая величина напряжения, при которой искрение делается непрерывным, и конденсатор погибает.

Максимальное напряжение, при котором самовосстановление происходит без ухудшения качества конденсатора, называют напряжением испытания на срок службы; оно равно примерно 1,4 рабочего напряжения. Максимальное напряжение, которое может быть кратковременно приложено к конденсатору (не более чем на 60 *сек*) без его разрушения, носит название напряжения искрения. Оно примерно равно удвоенному рабочему напряжению. Таким образом, необходимо избегать воздействия длительных перенапряжений на данный тип конденсатора.

В более современных типах металлобумажных конденсаторов используют лакированную бумагу, металлизированную алюминием или цинком, нанесенными методом испарения в вакууме. В некоторых типах применяют комбинацию из металлизированной бумаги и металлизированной пленки из полиэтилентерефталата. При этом слой бумаги является носителем пропиточной массы, что улучшает сопротивление изоляции и увеличивает срок службы.

Слой металла, нанесенный методом испарения, чрезвычайно тонок, его толщина порядка 0,1 *мк*. Для удаления слабых мест металлизированную ленту диэлектрика пропускают между металлическими роликами, на которые подается рабочее напряжение конденсатора.

При намотке секций свободные закраины двух металлизированных лент должны быть направлены в противоположные стороны, а сами ленты несколько сдвинуты по ширине одна по отношению к другой. При рабочем напря-

жении до 200 *в* применяют однослойные конденсаторы, для более высоких напряжений — дополнительные слои неме-

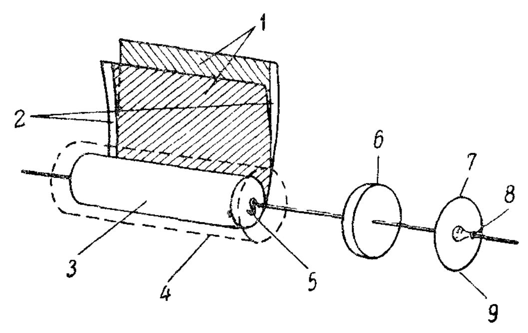


Рис. 6-7. Конструкция цилиндрического металлобумажного конденсатора.

1 — ленты металлизированной бумаги; *2* — закранны; *3* — секция конденсатора; *4* — металлический корпус; *5* — место припайки выводного проводника к слою напыленного металла на торце секции; *6* — бумажный изолирующий колпачок; *7* — место припайки крышки к корпусу; *8* — место запайки выводного проводника в крышку; *9* — крышка, представляющая собой стеклянную шайбу с коваровой арматурой.

таллизированной бумаги. На торцы секций для их контактирования и последующей припайки выводов напыляют слой меди. Типичная конструкция цилиндрического металлобумажного конденсатора показана на рис. 6-7.

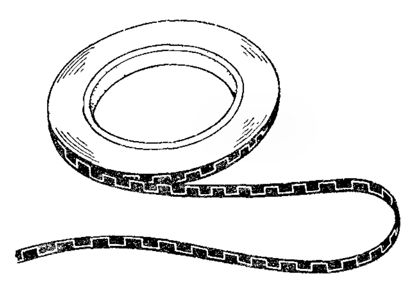


Рис. 6-8. Металлизированная бумага с зубчатой закраиной для намотки одноленточных конденсаторов по патенту фирмы «Хэнт».

Одноленточные металлобумажные конденсаторы с зубчатой закраиной

По технологии, разработанной фирмой «Хэнт», можно изготовлять одноленточные металлизированные конденсаторы (рис. 6-8) путем нанесения разноименных обкладок на одну и ту же сторону диэлектрика. При этом на поверхности бумаги, металлизированной алюминием, создается фигурная зубчатая закраина, которая образует изолирующую дорожку между разноименными электродами.

Для того чтобы при намотке разноименные обкладки перекрывались, создавая емкость, необходимо выбирать длину каждого элемента обкладки равной длине окружности поперечного сечения секции. В процессе намотки, с увеличением числа намотанных витков, диаметр секции увеличивается, что требует соответственного увеличения длин элементарных обкладок. Этот метод производства дает возможность изготовлять исключительно компактные конденсаторы. Внутренняя конструкция такого коденсатора показана на рис. 6-9.

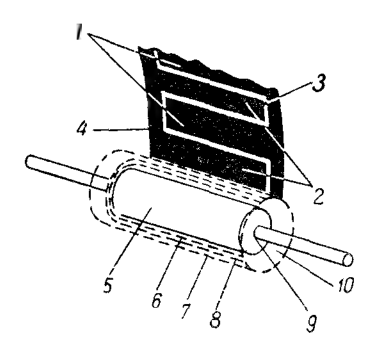


Рис. 6-9. Конструкция одноленточного металлобумажного конденсатора.

1 — часть металлического слоя, образующая первую обкладку; *2* — часть металлического слоя, образующая вторую обкладку; *3* — лишенная металла закраина, изолирующая первую обкладку от второй; *4* — металлический слой, служащий отводом от второй обкладки по всей длине ленты; *5* — намотанная секция; *6* — внутренний металлический корпус; *7* — внешний металлический корпус; *8* — слой изоляции; *9* — место припайки вывода к торцу секции, металлизированному напылением; *10* — уплотнение из синтетической смолы.

Общие свойства металлобумажных конденсаторов

Сопротивление изоляции конденсаторов этого типа (за исключением конденсаторов с пленкой полиэтилентерефталата) значительно ниже, чем у аналогичных бумажно-фольговых конденсаторов. При температуре 25° С и рабочем напряжении постоянная времени составляет около 250 *Мом · мкф*. Диапазон рабочих температур конденсаторов, покрытых воскообразным компаундом и пропитанных вазелином, составляет от —55 до +85° С. Новые типы с комбинированным диэлектриком (бумага и полиэтилентерефталат) имеют значительно более высокое сопротивление изоляции. Эти конденсаторы, пропитанные минеральным воском и герметизированные в металлических цилиндрических корпусах, способны работать при температуре от —55 до +125° С без снижения номинального напряжения. Постоянная времени при рабочем напряжении и температуре 25° С — порядка 2000 *Мом · мкф* и при 85° С — порядка 100 *Мом · мкф*. Допуск по емкости ±10%. Коэффициент мощности при 25° С и частоте 1 *кгц* лежит в пре-

делах 0,005—0,015. Собственная индуктивность мала и приблизительно эквивалентна индуктивности куска металла того же размера и формы, что и конденсатор.

БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Большие бумажные конденсаторы применяют для улучшения коэффициента мощности промышленных установок при технической частоте. Применение повышенного давления в этих конденсаторах позволяет значительно повысить рабочее напряжение, сохраняя надежность их работы. Пробой бумажных конденсаторов обычно вызывается развитием ионизации в воздушных включениях в диэлектрике, что приводит к перегреву и обугливанию бумаги в этих местах и заканчивается пробоем изоляции. Напряжение, при котором происходит пробой воздуха, определяется кривой Пашена, приведенной на рис. 6-5. Кривые рис. 6-10 показывают увеличение рабочих напряжений переменного тока, соответствующих повышению давления при разных значениях толщины бумажного диэлектрика.

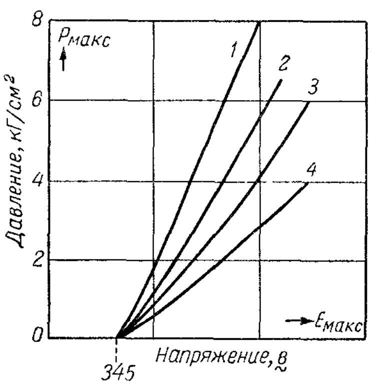


Рис. 6-10. Повышение рабочего напряжения бумажного конденсатора при повышении давления внутри корпуса для разных значений толщины диэлектрика: $P_{макс}$ — давление, необходимое для устранения ионизации при заданном значении приложенного напряжения и толщины изоляции; $E_{макс}$ — пиковое напряжение между выводами.

1 — толщина диэлектрика 20 *мк*; *2* — толщина диэлектрика 30 *мк*; *3* — толщина диэлектрика 40 *мк*; *4* — толщина диэлектрика 60 *мк*.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

СЛЮДА

Месторождения слюды имеются главным образом в Индии (Бенгалия и Мадрас), Канаде и Южной Америке. Слюда представляет собой природный слоистый материал,

способный расщепляться на тонкие пластинки. Эта способность обусловлена особенностями молекулярной структуры и является наиболее важным свойством слюды при ее использовании в электротехнике. Для применения в конденсаторах слюду обычно расщепляют до толщины 50 *мк*. Можно расщеплять слюду на пластинки еще меньшей толщины, но при этом резко возрастает брак из-за механического повреждения пластинок. Специальным лабораторным способом можно получать пластинки даже толщиной до 0,25 *мк*.

Несмотря на обилие сортов слюды, здесь рассмотрим только те, которые обычно применяют. Качество слюды каждого сорта может меняться в широких пределах.

Мусковит (белая слюда) — самый обычный вид слюды. Эта слюда чаще всего бесцветна и прозрачна. Имеет повышенную механическую прочность и максимальную рабочую температуру около 500° С. При температуре выше 600° С начинает разрушаться. Широко используется для электрической изоляции.

Рубиновая слюда (розовая) — разновидность мусковита. Пластинки высококачественной рубиновой слюды имеют наилучшие диэлектрические свойства. Широко используется для изоляции, в частности в качестве конденсаторного диэлектрика.

Флогопит (янтарная слюда) мягче мусковита, но верхний предел рабочей температуры выше (900—1000° С). Часто применяется для изоляции секций от корпуса или от обжимок. Диэлектрические свойства хуже, чем у хорошего мусковита.

Биотит (железистая или черная слюда). Электрические свойства хуже, чем у мусковита. Используется для электрической изоляции.

Вермикулит. Таково название группы гидросиликатов, представляющих собой продукт разрушения слюды. Главным образом это гидросиликаты алюминия, железа и магния. При постепенном нагреве они легко расслаиваются и вспучиваются.

Электрические свойства слюды различны для разных месторождений, как это видно из табл. 7-1. Необходимо отметить, что указанные здесь данные зависят от степени сухости образца и метода измерения. Коэффициент мощности слюды колеблется в широких пределах (от 0,02 до 0,0002, но может быть равен и 0,00005, если образец специально

Таблица 7-1

Электрические свойства слюды

Месторождение слюды	Удельное объемное сопротивление, *ом · см*	Диэлектрическая проницаемость	Пробивная напряженность, *кв/мм*
Бенгалия	$(15\div133)\cdot10^{12}$	2,5—7,0	50—80
Мадрас	$(7\div118)\cdot10^{12}$	2,8—7,0	40—120
Канада	$(0,4\div22)\cdot10^{12}$	2,9—3,0	70—90
Южная Америка	$(37\div40)\cdot10^{12}$	2,8—6,0	40—90

отобран и тщательно высушен). Удельный вес составляет 2,7—3,2. Надо иметь в виду, что диэлектрические свойства слюды необратимо ухудшаются при ее нагреве (для плохих образцов уже после 400° С) вследствие расслоения, вызванного дегидратацией. Слюда, будучи природным материалом, содержит загрязнения, количество которых зависит от месторождения. В процессе переработки слюды для конденсаторов и других целей применяется следующая терминология:

Слюда-сырец — необработанные кристаллы («книжки»), добытые из основной породы.

Очистка — процесс удаления грязи, пустой породы с краев кристалла.

Расколка — процесс раскалывания кристаллов слюды на пластины подходящей толщины.

Обрезная слюда — расколотые кристаллы слюды, обрезанные со всех сторон для удаления краевых дефектов.

Полуобрезная слюда — расколотая слюда, обрезанная только с двух сторон.

Блочная слюда — полностью обрезанная слюда с минимальной толщиной 0,48 *мм*.

Щепаная слюда — набор пластинок, полученных расщеплением одного и того же куска исходной блочной слюды. Пластинки посыпают обычно слюдяной пудрой для того, чтобы они не слипались.

Обрезка — процесс удаления краевых дефектов, который можно выполнять вручную, ножом и т. п. Способ обрезки отмечается в названии: обрезная слюда.

Скрап — отходы слюды на различных стадиях ее переработки.

Твердая слюда не показывает тенденции к расслоению при легком сгибе или нажатии пальцем. Толстые пластинки

такой слюды издают почти металлический звук при падении на твердую поверхность.

Для применения в конденсаторах обрезную слюду сортируют по размеру и качеству визуальным осмотром; размер пластинок составляет от 6 *см*^{2} и меньше до 25—30 *см*^{2}. Слюда обычно проходит два электрических испытания: на наличие проводящих включений и проколов (методом высокочастотной искры) и на величину добротности Q.

Проверяется и наличие таких дефектов, как воздушные включения, пятна, трещины, царапины и сквозные отверстия. По стандарту ASTM D.748/52T конденсаторная слюда разделяется на три класса.

Класс С1 — блочная или пластинчатая слюда. Эта слюда имеет наивысшую добротность ($Q \geqslant 2500$ при 1 *Мгц*, в конденсаторах) и пригодна для применения во всех типах серебрёных и фольговых конденсаторов для высокостабильных настроенных контуров, в том числе и для радиопередатчиков. Она дает также наивысшую добротность в диапазоне звуковых частот ($Q \geqslant 1000$ при 1 *кгц*).

Класс С2 — слюда, пригодная для общего применения; она имеет добротность не ниже 1500 при 1 *Мгц*, в конденсаторах. Нагрев конденсаторов из такой слюды в радиопередатчиках будет выше, чем из слюды класса С1.

Класс С3 — слюда с наихудшей добротностью ($Q \geqslant 200$ при 1 *Мгц*, в конденсаторах); эта слюда применяется при изготовлении фольговых конденсаторов опрессованной и открытой конструкции.

СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ОБКЛАДКАМИ ИЗ ФОЛЬГИ

Слюду, обработанную так, как описано выше, подвергают испытанию, после чего из нее вырезают пластинки требуемого размера. Затем пластинки слюды помещают между обкладками из латунной, оловянной или медной фольги и стягивают полученный пакет обжимками для того, чтобы жестко закрепить фольгу. Конструкция типового слюдяного опрессованного конденсатора с обкладками из фольги показана на рис. 7-1.

Выводные контакты закладывают при сборке и присоединяют к фольге точечной сваркой, причем все листочки фольги одной полярности соединяют вместе. Существенно, чтобы контактирование обеспечивало в дальнейшем отсутствие шума при работе конденсатора. Для защиты от меха-

нического повреждения и получения частичной герметизации пакеты часто опрессовывают пластмассой.

С целью уменьшения доступа влаги, а также снижения утечки по поверхности опрессованные конденсаторы иногда пропитывают воскообразным веществом. Другими методами герметизации пакетов являются заливка эпоксисмолой или

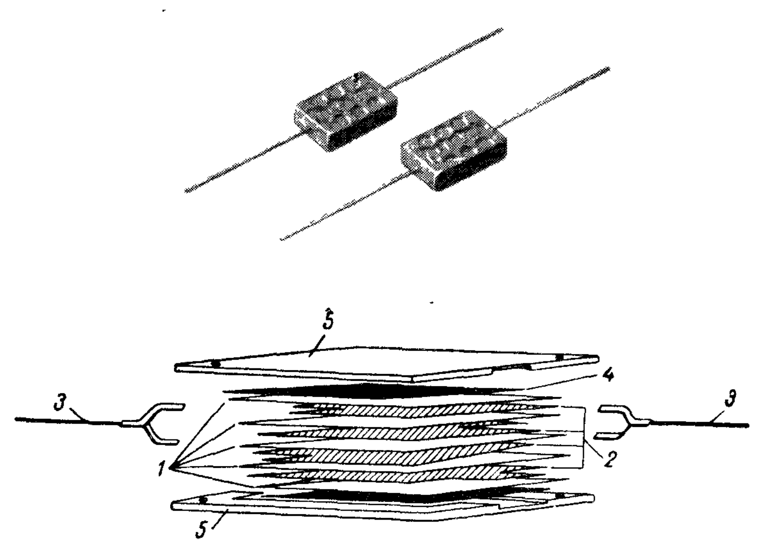


Рис. 7-1. Конструкция слюдяного конденсатора с обкладками из фольги.

1 — слюда; *2* — фольга; *3* — выводной проводник, спаянный с контактом, соединяемым с фольгой; *4* — металлические обжимки; *5* — пластмасса.

пропитка воскообразным компаундом с высокой температурой плавления.

Выбор вида герметизации слюдяных конденсаторов имеет важное значение, так как ток утечки и температурный предел использованных материалов часто ограничивают область применения конденсатора. Как фольговые слюдяные конденсаторы, так и конденсаторы из серебрёной слюды очень чувствительны к воздействию влаги; при проникновении влаги внутрь конденсатора резко увеличивается коэффициент мощности. Диэлектрическая проницаемость воды высока (около 80), а удельное сопротивление низко, поэтому поглощение относительно малого количества влаги

снизит сопротивление изоляции, увеличит коэффициент мощности и емкость. Это явление устраняют пропиткой и опрессовкой. Применяют различные пластмассы и другие влагозащитные материалы, например: воскообразные компаунды, термореактивные феноло-формальдегидные пластмассы (бакелит и т. п.) с наполнителями, термореактивные эпоксисмолы как с наполнителями, так и без них.

Кроме молекулярного проникновения через влагозащитный материал, влага может также проникать в конденсатор в местах выхода проволочных выводов. Поэтому для улучшения влагозащиты конденсаторы изготовляют в металлических, керамических или стеклянных корпусах с впаянными выводами.

Слюдяные конденсаторы с обкладками из фольги применяют в высокочастотных цепях в качестве соединительных и для других подобных целей, так как они имеют низкую индуктивность и малый коэффициент мощности. Эти конденсаторы допускают прохождение достаточно больших токов при радиочастоте, и поэтому их используют в радиопередатчиках.

В принципе для применения слюдяных фольговых конденсаторов нет ограничения по рабочей частоте, но практически предельная допустимая частота определяется длиной выводных проводников, утечкой по корпусу и т. д. (см. выше). Точное определение температурного коэффициента емкости для образцов разной конструкции и при колебании качества слюды часто затруднительно, но общее изменение характеристик незащищенного конденсатора с температурой обычно лежит в сравнительно узких пределах.

Диэлектрик большинства слюдяных конденсаторов, выпускаемых промышленностью, находится под заметным механическим давлением. Оно может возникать как от стяжки пакета при сборке, так и в результате процесса опрессовки. Измерения показывают, что повышение давления увеличивает температурный коэффициент и абсолютное значение емкости конденсатора. Различие в тепловом расширении материалов, использованных в конструкции, приводит к изменению давления с температурой; поэтому слюдяной конденсатор дает сложное и нелинейное изменение емкости при изменении температуры.

Прецизионные герметизированные слюдяные конденсаторы используют при комнатной температуре в качестве

образцовых емкостей в течение многих лет. Стабильность емкости таких конденсаторов описана в работе Гартона, опубликованной в 1946 г.

В качестве примера стабильности прецизионных слюдяных конденсаторов можно привести опыт, проведенный Британской национальной физической лабораторией. Был взят конденсатор 20-летней давности, выдержан в течение

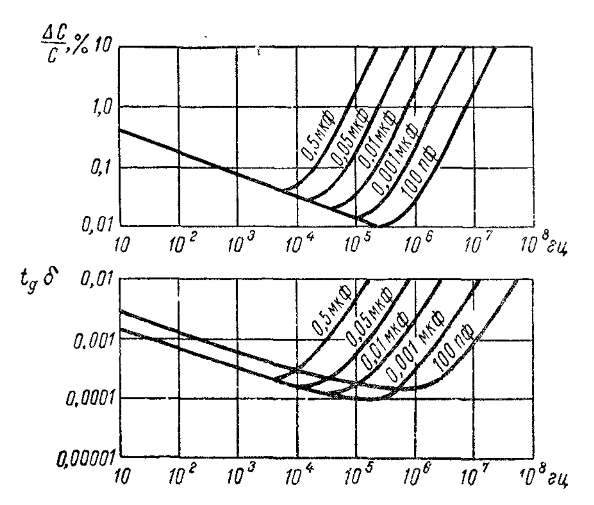


Рис. 7-2. Изменение емкости и угла потерь с частотой для образцовых слюдяных конденсаторов фирмы «Дженерал рэдио» при различных значениях номинальной емкости.

года в эксикаторе при относительной влажности 65% и загерметизирован в латунный корпус со впаянными в крышку стеклянными изоляторами. После герметизации емкость конденсатора оставалась постоянной в пределах 10 054 ± 0,2 *пф* в течение всего испытательного периода, равного 10 000 *ч*. Коэффициент мощности перед герметизацией был равен 0,0006, а после сушки и герметизации уменьшился до 0,0001 и в дальнейшем оставался неизменным. Образцовые слюдяные конденсаторы, выпускаемые промышленностью, например тип 505 фирмы «Дженерал рэдио К°», имеют допуск по емкости, равный ±0,5% или ±3 *пф*. Изменение емкости и угла потерь с частотой для такого конденсатора показано на рис. 7-2.

СЛЮДЯНЫЕ СЕРЕБРЁНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ (МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫЕ СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ)

Серебрение слюдяных пластинок устраняет воздушный зазор между диэлектриком и обкладкой, что улучшает стабильность конденсаторов и уменьшает их размеры. Слюду испытывают и вырезают из нее пластинки нужного размера тем же способом, что и при изготовлении конденсаторов с обкладками из фольги.

Паста, применяемая при серебрении, представляет собой порошок окиси серебра, растертый в лавандовом масле.

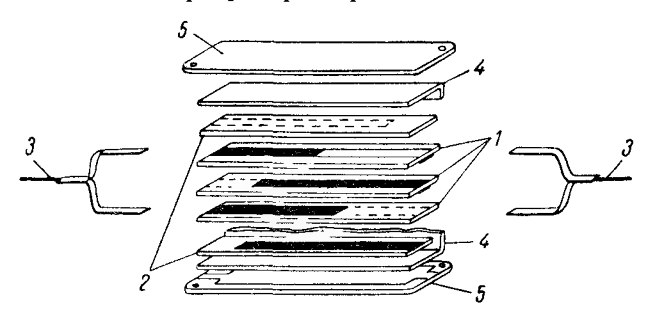


Рис. 7-3. Конструкция серебрёного слюдяного конденсатора.

1 — слюдяные пластинки, асимметрично посеребрённые с обеих сторон; 2 — крайние слюдяные пластинки, посеребрённые только с одной стороны каждая; 3 — выводы из луженой медной проволоки с припаянными к ним полосками гибкой фольги, которые закладываются между серебрёной слюдой; 4 — металлические обжимки; 5 — изоляционные пластины из пластмассы.

Пасту наносят на чистую поверхность слюды. Затем пластинки обжигают при температуре 400—500° С. При этом масло улетучивается, а из окиси восстанавливается серебро. Методы нанесения серебряной пасты на пластинки слюды различны: можно использовать метод нанесения резиновым роликом через шелковую сетку или метод офсетной печати, причем в процессе серебрения пластинки слюды удерживаются присасывающимися зажимами. Обычно пластинки серебрят с обеих сторон асимметрично и собирают в пакеты со сдвигом участков, покрытых серебром, в противоположные стороны (рис. 7-3). Выводы припаивают прямо к торцам пакетов, хотя обычно для улучшения контакта с серебрёными обкладками между слюдяными серебрёными пластинками вкладывают маленькие кусочки латунной фольги

(рис. 7-3). Подгонка емкости каждого конденсатора до заданной величины может быть осуществлена с большой точностью путем удаления небольшого участка серебряной обкладки.

Процесс производства очень похож на описанный выше процесс изготовления слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги. Необходимое количество серебрёных пластин слюды (число их определяется общей заданной

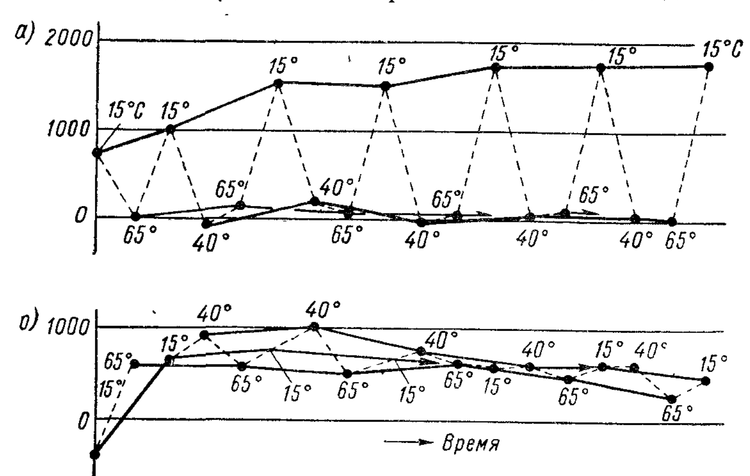
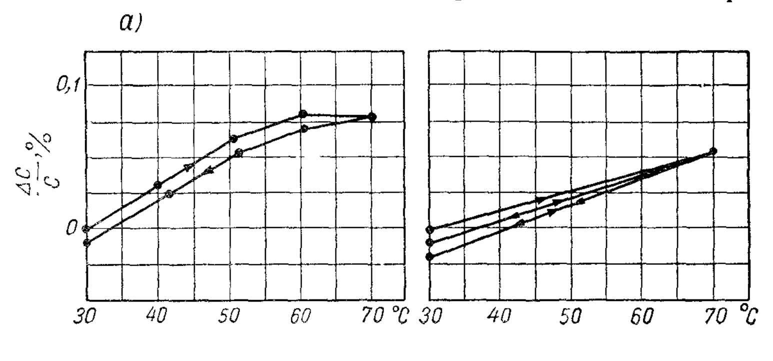


Рис. 7-4. Изменение емкости серебрёного слюдяного конденсатора во времени при воздействии температурных циклов: *а* — образец № 1; *б* — образец № 2; по оси ординат отложены изменения емкости в миллионных долях ее исходного значения; пунктирные линии соединяют результаты последовательно проведенных измерений; прямыми линиями соединены результаты измерений при одной и той же температуре.

емкостью) вместе с фольговыми выводами помещают в специальные обжимки; через фольговые выводы осуществляется контакт с серебряным слоем. Обжимка имеет прорезь, через которую часть серебряного слоя можно удалить для получения нужной емкости. К фольге припаивают проволочные выводы, после чего секции пропитывают обычно воскообразным компаундом, чтобы предохранить слой серебра от воздействия материала опрессовки. Конденсаторы опрессовывают феноло-формальдегидными пластмассами или другими подобными им материалами, которые используются в производстве фольговых конденсаторов. Конструкция типового серебрёного конденсатора показана на рис. 7-3.

Конденсаторы выпускают с допуском по емкости ±20, ±10, ±5, ±2 и ±1% при минимальном отклонении от номинала ±5 *пф*. Изменение емкости при воздействии темпера-



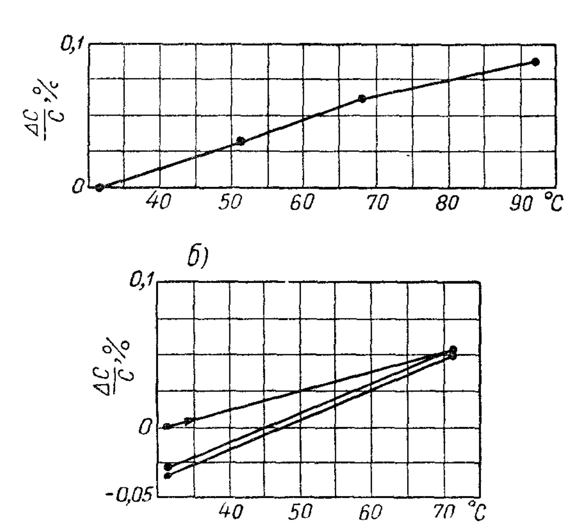


Рис. 7-5. Типичные кривые зависимости емкости слюдяных серебрёных конденсаторов от температуры: *а* — конденсаторы 220 *пф*, облицованные эпоксидной смолой; *б* — конденсатор 220 *пф*, опрессованный феноло-формальдегидной пластмассой.

турных циклов для типичных серебрёных конденсаторов показано в виде кривых на рис. 7-4. Типичные кривые зависимости емкости от температуры для опрессованных слюдяных конденсаторов изображены на рис. 7-5.

У слюдяных серебрёных конденсаторов, а также у керамических серебрёных наблюдается незакономерное изменение емкости, названное «мерцанием», которое вызывает скачкообразное изменение частоты при использовании таких конденсаторов в цепях настройки. Это явление обусловлено наличием отдельных «островков» серебра у края серебряного слоя, изолированных от основной обкладки тонкими воздушными зазорами. При улучшении технологии серебрения, обеспечивающем отсутствие таких «островков», «мерцания» не должно быть.

Для экспериментальных целей можно применять химическое серебрение слюды. Опишем один из таких методов. Поверхность слюды очищают органическими растворителями, после чего слюду промывают водой. Далее ее активируют погружением в 10-процентный раствор хлористого олова с добавкой 15-процентного водного раствора соляной кислоты. После промывки в проточной воде слюду погружают в смесь из 70% раствора формальдегида и 30% метилового спирта. Затем слюду вынимают, просушивают и проводят серебрение погружением в раствор (250 *мл*) следующего состава: 1 *г* азотнокислого серебра растворяют в 50 *мл* дистиллированной воды и добавляют водный раствор аммиака до тех пор, пока первоначально образовавшийся коричневый осадок не растворится; количество раствора доводят до 150 *мл*; непосредственно перед использованием в него добавляют раствор 6 *г* тартрата натрия — калия в 100 *мл* дистиллированной воды. Процесс серебрения занимает около 20 *мин*.

Так как тонкий слой серебра ограничивает допустимый ток конденсатора, то слюдяные серебрёные конденсаторы можно использовать при повышенной реактивной мощности только тогда, когда требуется очень малый температурный коэффициент емкости.

В прошлом, вплоть до 1946 г., возникали трудности, вызванные миграцией ионов серебра в серебрёных слюдяных конденсаторах, работающих при высокой напряженности поля на постоянном токе в условиях повышенной температуры окружающей среды и высокой влажности.

Новые конструкции и технология, используемые теперь промышленностью, обеспечивают лучшую влагозащиту, чем до 1946 г. Для того чтобы свести к минимуму возможность миграции ионов, следует соответственно снижать рабочую напряженность поля на постоянном токе при повышении рабочей температуры конденсатора.

СИНТЕТИЧЕСКАЯ СЛЮДА

В США синтетическую слюду вырабатывают во все возрастающих количествах. Во время второй мировой войны небольшое опытное производство такой слюды существовало в Германии. Синтетическую слюду можно изготовлять из смеси следующих ингредиентов (указано ориентировочное соотношение):

Окись алюминия (Al_2O_3)	11,5%
Окись магния (MgO)	32,7%
Песок (SiO_2)	30,7%
Криолит (K_2SiF_6)	25,1%

Технически чистые материалы подогревают в электрических печах при температуре 900° С, затем помещают в специальный фарфоровый тигель, расположенный в печи с газовым нагревом. Процесс нагрева до точки плавления 1300° С и последующего охлаждения до 900° С занимает 7 дней, в том числе 3 дня, необходимые для кристаллизации при постепенном снижении температуры приблизительно на 10° С в час. Фактическое время кристаллизации составляет 5—6 *ч*, но принимается коэффициент запаса, равный по крайней мере 500%.

Свойства синтетической слюды. Синтетическая слюда подобна флогопиту, но, в отличие от природной слюды, не имеет в своем составе воды. Поэтому она стабильна вплоть до точки плавления (1300° С), в то время как природная слюда при температуре от 400 до 500° С начинает выделять воду. Синтетическая слюда труднее расщепляется, чем природная, но также обладает плоскостями спайности. Этот материал более тверд, чем природный мусковит, который в свою очередь тверже природного флогопита. По гибкости пластинки подобны природной слюде, но легче поддаются штамповке.

Коэффициент мощности не больше, чем у природной слюды, а поверхностное сопротивление в 100—1000 раз выше, так как чистота материала относительно выше. При высоких температурах синтетическая слюда в большей степени склонна к абсорбции газов, чем к их выделению. В результате этого обеспечивается необычное отсутствие шумов при использовании деталей из синтетической слюды в качестве изоляции в радиолампах. Для этой цели первоначально и предназначался этот материал.

Синтетическая слюда выпускается в трех основных формах: слюда со стеклянной связкой (микалекс), восстановленная листовая слюда, горячепрессованная слюда.

Слюда со стеклянной связкой, изготовляемая из природной слюды и борносвинцового стекла, выпускается в течение многих лет. Замещение природных кристаллов синтетической слюдой улучшает все свойства, в частности нагревостойкость и механическую прочность. Повышается стабильность характеристик при высокой температуре, так как отщепления воды не происходит.

Восстановленную листовую слюду изготовляют из маленьких чешуек слюды с кремнийорганической связкой. При использовании природной слюды тепловое разрушение материала происходит при температурах порядка 650—750° С. Если листы изготовить с использованием кристаллов синтетической слюды, то разрушения не будет даже при 830° С.

Горячепрессованная слюда — плотный диэлектрик, напоминающий собой керамику и получаемый горячим прессованием синтетической слюды в гомогенный блок. Электрические и механические свойства зависят от степени дисперсности порошка синтетической слюды.

СЛЮДЯНАЯ БУМАГА

Разработаны методы получения слюдяной бумаги в виде длинных листов однородной толщины. Листы изготовляют из чешуек слюды с использованием процесса производства, отчасти напоминающего изготовление бумаги. Слюду мусковит разделяют на отдельные чешуйки, нагревают до критической температуры, затем погружают в раствор бикарбоната натрия, высушивают и смачивают слабым раствором соляной или серной кислоты. Затем ее промывают, перемешивают с водой и пропускают, как бумажную массу, через бумагоделательную машину.

Слюдяную бумагу со связкой получают путем пропитки слюдяной бумаги кремнийорганической смолой. Тангенс угла потерь выше, чем у природной слюды, причем необходимо избегать увлажнения материала. Такую бумагу изготовляют различной толщины: от 25 до 50 *мк*.

Средняя электрическая прочность слюдяной бумаги без связки составляет около 32 *кв/мм*. Тангенс угла потерь при 60 *гц* равен 0,0006 при 25° С и 0,0015 при 100° С. Тангенс

угла потерь для двух слоев слюдяной бумаги, пропитанной кремнийорганической смолой (содержание смолы 25%) при 60 *гц* и 25° С имеет величину порядка 0,02. Минимальное значение средней пробивной напряженности для материала, пропитанного кремнийорганической смолой, составляет 80 *кв/мм*.

ЛИСТОВАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СЛЮДА

Другой процесс, посредством которого изготовляют листы интегрированной слюды, основан на том, что природные силы связи в тонких свежерасщепленных чешуйках слюды достаточно сильны для того, чтобы прочно связать вместе слои чешуек и создать из них тонкий лист. При этом связующего вещества не добавляют. Полученный слюдяной лист обладает практически такими же электрическими свойствами, как и природная слюда, расщеплением которой были получены чешуйки.

Все четыре основных типа природной слюды — мусковит, флогопит, биотит и вермикулит — можно применять для получения интегрированной листовой слюды, так же как и синтетическую слюду. Первоначально слюду с помощью дезинтегратора расщепляют на чешуйки толщиной меньше 4 *мк*. В дезинтеграторе для расщепления слюды используют струю воды или пара, движущегося с большой скоростью. Раздробленная слюда попадает в водяные камеры и переносится водой на поверхность движущегося ремня, проходящего над устройством с вакуумным отсосом, которое удерживает чешуйки слюды на месте до тех пор, пока не будет удалена вода. Полученный лист высушивают. Для повышения механической прочности его погружают в раствор, содержащий 6% кремнийорганической смолы.

Электрические свойства интегрированной слюды однородны. Диэлектрические проницаемости интегрированной слюды и материала, из которого она изготовлена, различаются не более чем на 10%, а в большинстве случаев меньше чем на 5%. Тангенс угла потерь зависит до некоторой степени от использованной пропитки; листы, предназначенные для применения в конденсаторах, пропитывают полистиролом или другим подобным ему материалом с малым углом потерь. Это дает слюдяную бумагу с тангенсом угла потерь при частоте 1 *Мгц* порядка 0,0009. Когда изготовление ведется в лабораторных условиях с приме-

нением дистиллированной воды, угол потерь слюдяной бумаги может быть снижен до 0,0003.

Электрическая прочность непропитанной интегрированной слюды толщиной 0,25 *мм* составляет в среднем около 16 *кв/мм*. Материал имеет высокую гигроскопичность. Добавка небольшого количества кремнийорганической смолы уменьшает абсорбцию воды. Хрупкость материала можно уменьшить, подвергая его воздействию насыщенного пара или увлажненного воздуха, после чего возможны намотка в рулон и изготовление деталей сложной формы. После оформления изделий слюду высушивают и пропитывают.

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ СЛЮДЯНОЙ БУМАГИ

Несколько фирм рекламируют конденсаторы из слюдяной бумаги для их применения в условиях высокой температуры окружающей среды.

Различают два типа конструкций таких конденсаторов: плоский многопластинчатый, подобный обычным слюдяным конденсаторам, и цилиндрический тип, подобный бумажным или пленочным конденсаторам. Цилиндрический тип конструкции использовали при разработке конденсаторов для систем зажигания реактивных двигателей, а плоский тип применяют теперь в конденсаторах для обычной радиоаппаратуры. Последние выпускают в металлических герметизированных прямоугольных корпусах или опрессовывают эпоксисмолой; применяют также и открытую, негерметизированную конструкцию. Типичные характеристики герметизированных конденсаторов следующие:

Емкость	От 0,01 до 4 *мкф*
Рабочее напряжение постоянного тока	От 150 *в* до 10 *кв*
Минимальная добротность при 25° С	1000
Коэффициент мощности (максимальное значение):	
при 25° С	0,005
при 315° С	0,030
Диэлектрическая абсорбция после разряда в течение 10 *сек*	Меньше 0,1%
Допускаемое отклонение емкости от номинала	±10%
Диапазон рабочих температур	От —55 до +315° С
Постоянная времени:	
при 25° С	10 000 *Мом · мкф*
при 315° С	4 *Мом · мкф*
Изменение емкости (максимальное значение) при 315° С	3%

В качестве пропиточной массы обычно используют кремнийорганическую смолу. При воздействии радиации на конденсаторы данного типа наблюдается лишь небольшое изменение емкости. Коэффициент мощности не изменяется, а сопротивление изоляции даже улучшается.

СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

К конденсаторам для радиопередатчиков предъявляются следующие основные требования:

1) большая допускаемая реактивная мощность при радиочастотах;

2) высокое номинальное напряжение постоянного тока;

3) низкая собственная индуктивность.

Слюдяные конденсаторы используют в передатчиках, главным образом как разделительные при частоте не выше 30 *Мгц*, а также в модуляторах. Низкий коэффициент мощности и высокая электрическая прочность позволяют применять слюдяные конденсаторы большой мощности в тех случаях, когда требуются высокое номинальное напряжение и высокие значения емкости. Обычно конденсаторная секция состоит из сжатой в обжимках стопки пластинок слюды и листков оловянной фольги. Если применяется конструкция с серебрёной слюдой, то номинальный ток должен быть снижен на 50% (табл. 7-2). Все соединения пропаивают для обеспечения большой нагрузки током. Набор секций монтируют в керамическом корпусе и для влагозащиты заливают воскообразным компаундом.

Чаще всего конденсатор собирают из ряда секций, соединенных последовательно. Количество секций зависит от рабочего напряжения. Типичные характеристики слюдяных конденсаторов этого типа также приведены в табл. 7-2.

Емкость слюдяных конденсаторов для радиопередатчиков составляет до 0,1 *мкф* в зависимости от номинальных значений напряжения и тока. Размеры конденсаторов колеблются в пределах от 63,5 *мм* по высоте и 95 *мм* по диаметру (расстояние между центрами монтажных отверстий) для типа СМ75 до 254 *мм* по высоте и 102 *мм* по диаметру для типа СМ95.

Слюдяные конденсаторы для радиопередатчиков с пониженным номинальным напряжением изготовляют также в пластмассовых прессованных прямоугольных корпусах

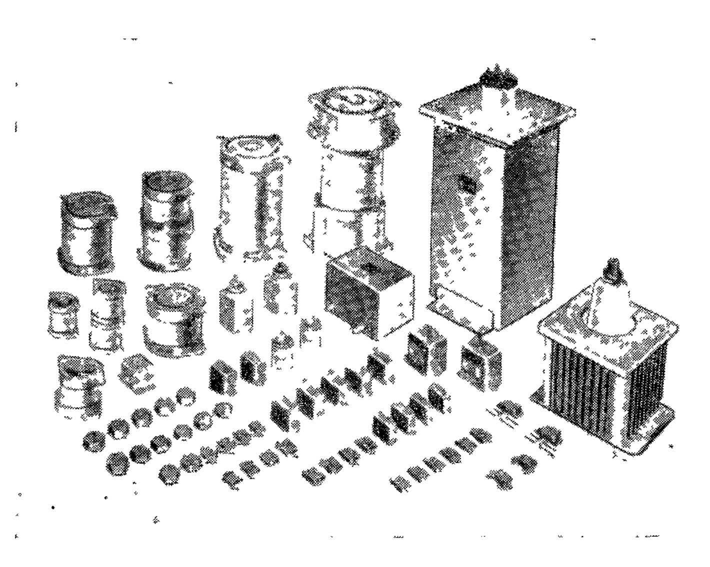


Рис. 7-6. Типичные слюдяные конденсаторы для радиопередающей аппаратуры, изготовляемые фирмой «Корнелл—Дюбилье».

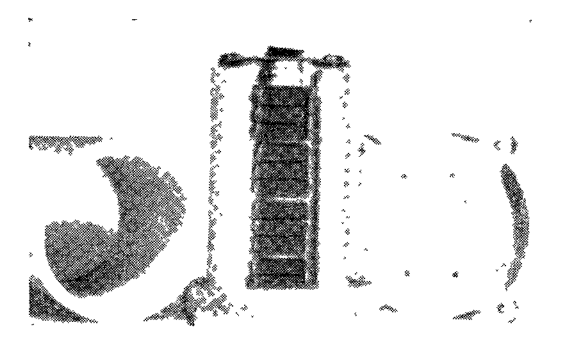


Рис. 7-7. Внутреннее устройство и детали внешнего оформления для слюдяного конденсатора фирмы «Аэровокс», рассчитанного на применение в радиопередатчике.

(рис. 7-6). Внутреннее устройство типового слюдяного конденсатора в керамическом корпусе показано на рис. 7-7.

Таблица 7-2

Типичные характеристики слюдяных конденсаторов для радиопередатчиков

Обозначение типа *	Максимальное пиковое напряжение, *кв*	Номинальный ток, *а*, при заданной частоте **			
		3 *Мгц*	1 *Мгц*	0,3 *Мгц*	0,1 *Мгц*
СМ75	6	16	16	12	6,2
СМ80	10	16	13	8,2	3,6
СМ85	20	16	15	8,2	3,9
СМ90	30	16	15	10	5,1
СМ95	35	33	36	20	5,6

* По военной спецификации MIL-C-5.

** Для конденсаторов с характеристикой D, E, F, изготовленных из серебрёной слюды, по MIL-C-5 номинальный ток должен быть снижен на 50%.

СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПУГОВИЧНОГО ТИПА

Пуговичные слюдяные конденсаторы применяют обычно в качестве проходных высокочастотных конденсаторов. По конструкции эти конденсаторы подразделяются на два типа: герметизированные и защищенные от влаги облицовкой компаундом или пропиткой. Конденсатор состоит из стопки соединенных параллельно дисков серебрёной слюды; высокопотенциальный вывод проходит по оси стопки через центральное отверстие в дисках, соединяясь с одной из обкладок каждого диска; стопка помещена в серебрёный латунный корпус, служащий одновременно вторым выводом; это осуществляется путем создания контакта между корпусом и сдвинутой к краю диска второй серебряной обкладкой по высоте всей стопки.

Такие элементы пропитывают воскообразной массой и покрывают защитным слоем влагоустойчивого компаунда на основе полиэфира. Применяют также и полную герметизацию конденсаторов с использованием для изоляции вывода стеклянного проходного изолятора. После воздействия влаги сопротивление изоляции конденсаторов, пропитан-

ных и защищенных полиэфирным компаундом, неустойчиво и находится в пределах от 100 до 50 *Мом*. Конденсаторы с вакуум-плотной герметизацией имеют высокое сопротивление изоляции, больше 2000 *Мом*. Этот тип конструкции допускает радиальное распространение линий тока до центрального ввода по всей окружности (360°), что дает малую внутреннюю индуктивность. В совокупности с использованием коротких жестких выводов это обеспечивает минимальную внешнюю индуктивность и позволяет получить конденсатор с малой общей индуктивностью, пригодный для работы при высоких и ультравысоких частотах.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

КЕРАМИЧЕСКИЕ, СТЕКЛЯННЫЕ И СТЕКЛОЭМАЛЕВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Керамические материалы в течение многих лет используют в качестве диэлектриков, так как они способны выдерживать суровые рабочие условия. Будучи полностью инертными, они выдерживают номинальное рабочее напряжение практически неограниченно долгое время, а также сохраняют постоянство своей формы и физических характеристик в нормальных условиях.

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы из керамики с малыми потерями и низкой диэлектрической проницаемостью

Исходные материалы для изготовления керамики как природные минералы неизбежно содержат загрязнения. Поэтому после тщательной очистки, перемешивания и прессования в заготовки требуемой формы их прокаливают при температуре ниже точки спекания или плавления, достаточной для окисления любого органического вещества и для перевода в окислы карбонатов, хлоридов или сульфатов, содержащихся в исходных продуктах. Полученную заготовку затем размалывают в порошок, смешивают с водой или со смягчителями (смолы или масла) и механически доводят до состояния тонкой пасты, из которой методом прессования или выдавливания (протяжки) можно

сделать заготовки для конденсаторов. После тщательно контролируемой сушки заготовки обжигают в определенной атмосфере (обычно окислительной) при температурах от 1200 до 1400° С до остекловывания, обеспечивающего отсутствие пористости.

Конденсаторы обычно изготовляют в форме цилиндров или дисков, но иногда им придают также вид плоских пластинок прямоугольной формы. Конструкция типичного цилиндрического неизолированного конденсатора показана на рис. 8-1.

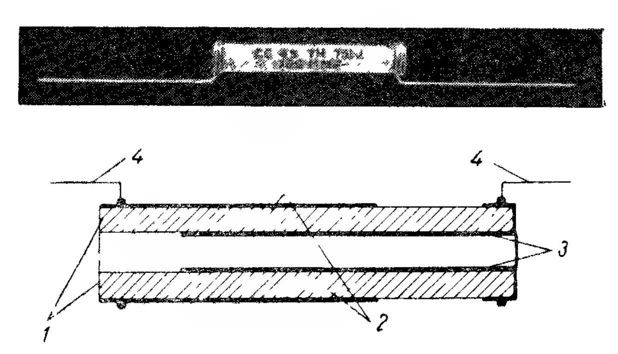


Рис. 8-1. Конструкция неизолированного керамического конденсатора.

1 — керамическая трубка с лаковым покрытием; 2 — слой серебра на наружной поверхности трубки, образующий первую обкладку; 3 — слой серебра на внутренней поверхности, образующий вторую обкладку; 4 — проволочные выводы, обернутые вокруг концов трубки.

Конденсаторы с малым углом потерь обычно изготовляют из стеатита (керамика на основе талька) с диэлектрической проницаемостью порядка 8. В качестве плавня используют полевой шпат или, что более желательно, плавень, не содержащий щелочных металлов, например углекислый барий.

Если керамическая заготовка имеет вид трубки, то для получения из нее конденсатора металлизируют внутреннюю и внешнюю поверхности трубки. Это обычно достигается нанесением серебряной пасты кисточкой с последующим вжиганием; реже применяют погружение трубочки, защищенной экранами, в жидкую пасту. Серебряную пасту при металлизации вжигают при температуре 700—800° С. Если процесс серебрения проводят недостаточно тщательно, то может возникнуть явление мерцания. По этой причине

все этапы процесса серебрения необходимо тщательно контролировать. Плохое серебрение может также ухудшить температурный коэффициент емкости.

Емкость цилиндрического конденсатора рассчитывают по формуле

$$C = \frac{0{,}0241\ l\varepsilon}{\lg \frac{D}{d}} \cdot 10^{-6}\ [\text{мкф}],$$

где l — длина обкладок, *мм*;
D — внешний диаметр трубки, *мм*;
d — внутренний диаметр трубки, *мм*;
ε — диэлектрическая проницаемость керамики.

Из этой формулы видно, что емкость цилиндрического конденсатора не зависит от диаметра трубки если отношение между внутренним и внешним диаметрами остается тем же самым; емкость зависит только от длины трубки и длины перекрытия серебряных слоев. Пробивное напряжение цилиндрического конденсатора, в отличие от емкости, изменяется с толщиной стенки трубки. Общие характеристики стеатитовых конденсаторов следующие:

Диэлектрическая проницаемость при 1 *Мгц*	$\varepsilon = 8$
Тангенс угла потерь	0,001
Температурный коэффициент емкости изменяется в пределах	От $+100$ до $+120 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Диапазон частот (приблизительно)	От 100 *гц* до 200 *Мгц*
Максимальная рабочая температура (обычно ограничивается материалом покрытия и припоем, использованным для пайки)	150° С
Минимальная рабочая температура (в принципе)	Не ограничена
Пробивное напряжение (приблизительно, в зависимости от размеров)	500 *в*

Конденсаторы из керамики со средним значением диэлектрической проницаемости

Диэлектрики со средним значением диэлектрической проницаемости, используемые в настоящее время, состоят в основном из двуокиси титана (TiO_2) или ее производных — титанатов щелочноземельных металлов ($MTiO_3$). Окись титана встречается в природе в виде минерала рутила, анатаза и реже брукита, а также в виде таких природных

сочетаний, как ильменит и перовскит. Однако выделение TiO_2 в чистом виде представляет значительные трудности.

Основные физические свойства различных диэлектриков рассматриваемого типа очень сходны. Для изготовления из них конденсаторов применяют обычные, описанные выше методы керамического производства с применением окислительной среды. Известное затруднение вносит опасность частичного восстановления и необходимость в более тщательном контроле температуры.

Материалы данного типа характеризуются большой твердостью, нагревостойкостью и химической инертностью; диэлектрические свойства их достаточно хороши, но электрическая прочность ниже, чем у слюды, а проводимость достигает заметной величины при температурах 150° С и выше. В основном эти материалы используют для изготовления конденсаторов.

Высокая диэлектрическая проницаемость двуокиси титана во всех ее трех формах впервые была замечена Шмидтом в 1902 г. Для рутила он получил $\varepsilon = 170$ в направлении, параллельном кристаллической оси, и $\varepsilon = 80$ в перпендикулярном направлении. Низкие значения были получены для анатаза, который также относится к тетрагональной кристаллической системе; для брукита, имеющего ромбоэдрическую структуру, Шмидт приводит величину ε, равную 80.

Данные Шмидта были проверены Эукеном и Бюхнером в 1934 г., изучавшими температурную зависимость диэлектрической проницаемости на образцах природных монокристаллов. Они нашли, что диэлектрическая проницаемость рутила, измеренная в направлении, параллельном оси кристалла, проходит через минимум вблизи комнатной температуры, а измеренная в перпендикулярном направлении, достигает минимального значения при температуре 100° С. Нет полной уверенности, что эти данные можно распространить на чистые материалы (в противоположность материалам минерального происхождения).

Для анатаза они нашли, что ε (в направлении, параллельном оси) увеличивается с температурой в интервале от —100 до +100° С.

Для брукита и анатаза в направлении, перпендикулярном оси, наблюдения не были проведены. Поскольку эти измерения были сделаны на образцах природных минералов, роль примесей не была выяснена.

В 1935 г. французские исследователи, используя сильно уплотненные образцы из химически чистой двуокиси титана, подтвердили высокие значения ε, полученные Шмидтом, а также Эйкеном и Бюгнером (с учетом наличия пор в образцах и беспорядочной ориентации частиц). Таким образом было твердо установлено, что двуокись титана имеет высокую диэлектрическую проницаемость. Вскоре началось производственное изготовление этого материала.

Температурный коэффициент емкости при использовании TiO_2 составляет около $-800 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Коэффициент мощности при радиочастотах обычно меньше 0,0003. Диэлектрическая проницаемость продолжает оставаться высокой вплоть до верхнего предела радиочастот. Потери для чистой двуокиси титана увеличиваются в области низких частот, достигая примерно 1—2% при 1 *кгц* и становясь очень большими при нескольких сотнях герц; при введении соответствующих добавок потери можно значительно уменьшить.

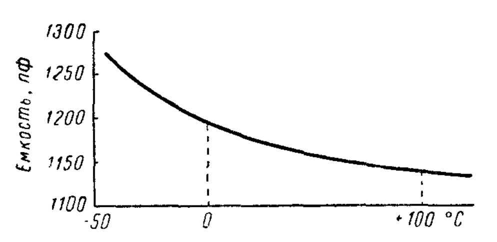


Рис. 8-2. Зависимость емкости от температуры для конденсатора из керамики со средним значением диэлектрической проницаемости.

Добавление постепенно увеличиваемого количества окиси бария первоначально снижает диэлектрическую проницаемость, затем увеличивает ее, в то же время изменяя знак температурного коэффициента. Малые потери и линейность характеристик получаются до тех пор, пока соотношение компонентов смеси не сделается почти эквимолекулярным; до этого предела смесь окислов титана и бария ведет себя как обычный диэлектрик с очень высокой диэлектрической проницаемостью, не проявляя наличия гистерезиса. Смесь окислов титана и кальция ведет себя подобным же образом. Полезный диэлектрик может быть получен, когда состав смеси будет примерно соответствовать титанату кальция ($\varepsilon = 150$, $ТК\varepsilon = -1200 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$). Смесь окислов титана и магния дает пониженную ε; для смеси, близкой к титанату магния, получены $\varepsilon = 14 \div 16$ и положительный температурный коэффициент.

Составляя смеси двуокиси титана с окислами уже названных щелочноземельных металлов, можно контролировать температурный коэффициент емкости керамических конденсаторов от небольших положительных значений, проходя через значения, близкие к нулю, до больших отрицательных значений. Эти диэлектрики используют главным образом в термокомпенсирующих конденсаторах для приемников связи и т. п.

Для конденсаторов со средней величиной диэлектрической проницаемости диэлектрика порядка 70—100 характер зависимости емкости от температуры графически представлен на рис. 8-2.

Конденсаторы из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью

Основным преимуществом конденсаторов этого типа является возможность получения большой емкости в малом объеме (высокой удельной емкости). Можно использовать значения диэлектрической проницаемости порядка 1000—5000 и даже выше, но лишь при некоторых ограничениях.

Методы производства основаны на тех же принципах, которые были описаны выше. Чтобы получить значения ε указанного порядка, используют титанат бария в чистом виде или с частичной заменой бария другими металлами. Этот материал отличается наличием точки Кюри и сегнетоэлектрическими свойствами.

Если требуются ультравысокие значения диэлектрической проницаемости без гистерезиса, то их можно получить только при температуре выше точки Кюри. Керамика будет иметь большой отрицательный температурный коэффициент, но температурный интервал ее применения может быть все же достаточно широким. Подбором состава, который дает точку Кюри при очень низких температурах, можно создать материалы с достаточно большой ε, с относительно линейным изменением емкости в нормальном интервале рабочих температур и относительно низкими потерями.

Эквимолекулярный состав смеси окислов бария и титана, соответствующий соединению $BaTiO_3$ (титанат бария), дает керамический материал, резко отличающийся своими свойствами от титановой керамики со средней величиной диэлектрической проницаемости.

Характер изменения диэлектрической проницаемости титаната бария с температурой показан на рис. 8-3. При температуре t_a (порядка 110—120° C) наблюдается очень резкий максимум; величина ε может превышать 9000. Выше этой точки диэлектрическая проницаемость снижается в соответствии с законом Кюри—Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{a}{t - t_C},$$

где a — постоянная;

t — температура окружающей среды, °C;

t_C — температура в точке Кюри.

Температура t_a весьма незначительно отличается от t_C. Ниже t_a диэлектрическая проницаемость круто падает до относительно низкой величины, обычно порядка 1000—1500. На этом уровне она сохраняется постоянной до второй точки Кюри t'_C (приблизительно 0° C) и затем снова снижается.

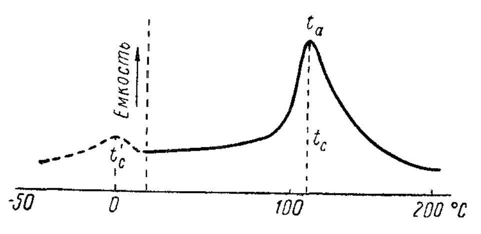


Рис. 8-3. Зависимость емкости от температуры для конденсатора из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью.

Наиболее важным изменением свойств материала является то, что гистерезис (см. ниже), вызывающий значительное увеличение потерь в сильных полях при температуре ниже t_C, исчезает при температуре выше этой точки. Следовательно, ниже этого значения величины диэлектрической проницаемости и коэффициента мощности могут быть определены только при исчезающе малой напряженности поля.

Температуру t'_C, упомянутую выше, часто называют нижней точкой Кюри. Она соответствует вторичному изменению кристаллической структуры; переход через эту температуру не сопровождается каким-либо заметным изменением электрических свойств, и гистерезис, в частности, не изменяется.

Температура Кюри для титаната бария приблизительно равна 120° C. Она снижается, если некоторое количество бария заменить стронцием; при соотношении Ba : Sr = = 70:30 точка Кюри равна 0° C, а при соотношении

40:60 равна —120°С. Внутри этого интервала температура точки Кюри линейно падает с изменением соотношения составных частей.

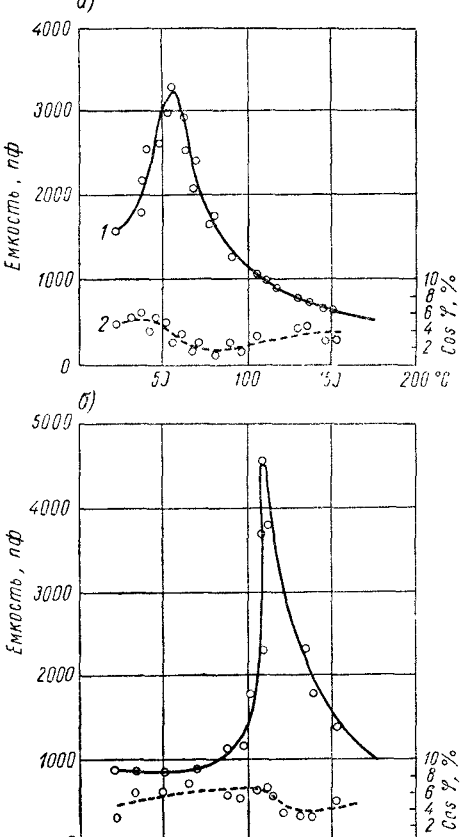


Рис. 8-4. Зависимость емкости и коэффициента мощности от температуры для керамических конденсаторов из керамики с высокой ε: *а* — емкость 1500 *пф*, диэлектрик типа К3000; *б* — емкость 1000 *пф*, диэлектрик типа К1250.

1 — емкость; *2* — коэффициент мощности; измерения проведены при частоте 5 *кгц* и напряжении 3 *в*.

Если вместо замещения бария стронцием уменьшить содержание двуокиси титана в смеси $BaO \cdot TiO_2$, то точка Кюри снижается. Другие материалы, такие, как смеси с окисью кальция, также могут быть добавлены для снижения точки Кюри. Замещение некоторого количества бария свинцом повышает точку Кюри.

В точке Кюри происходит ряд важнейших физических изменений. Кубическая кристаллическая решетка при снижении температуры переходит в тетрагональную форму; одно ребро элементарного куба удлиняется, а два других сокращаются, в то время как структура в целом испытывает слабый сдвиг. Точная величина смещения ионов еще неизвестна, и по этому вопросу ведутся исследования.

Эффект этих изменений находит отражение в конденсаторах, что подтверждается типовыми кривыми зависимости

емкости от температуры для керамических конденсаторов емкостью 1500 *пф* и 1000 *пф* из материала, имеющего $\varepsilon = 1250$ (рис. 8-4).

Изменением соотношения компонентов максимум на кривой может быть перемещен вдоль оси температур. Были сделаны многочисленные попытки выровнять кривую $C = f(t)$ добавлением различных веществ, главным образом из серии барий-стронций-титанатов. Эффект этих добавок различен. Например, введение магния снижает коэффициент потерь, расширяет пик диэлектрической проницаемости и сдвигает его в сторону более низких температур.

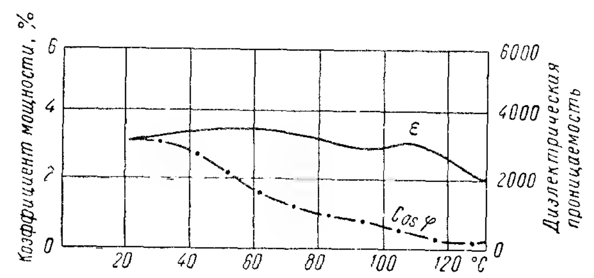


Рис. 8-5. Зависимость диэлектрической проницаемости и коэффициента мощности от температуры для типичной керамики с высокой диэлектрической проницаемостью производства фирмы «Стеатит энд порселан продэктс».

Цирконий оказывает аналогичное влияние, но он не воздействует на величину коэффициента мощности. Олово меньше расширяет пик диэлектрической проницаемости, чем цирконий. Свинец перемещает максимум в сторону повышенных температур.

В США и Англии были проведены длительные работы для обеспечения более пологой формы кривой $C = f(t)$ путем введения различных комбинаций добавок этого типа. Форма полученных кривых показывает, что когда задается необходимая емкость, то лучше точно оговаривать минимальное значение, в частности для конденсаторов развязки, с таким расчетом, чтобы при изменениях температуры емкость не снижалась ниже этого значения, а только увеличивалась.

Типичные кривые для хорошего современного конденсатора из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью приведены на рис. 8-5; можно заметить, что в

интервале температур от 20 до 100° С кривая $C = f(t)$ имеет достаточно плоскую форму.

Могут быть изготовлены конденсаторы из материала, имеющего в широком интервале температур $\varepsilon = 3000$.

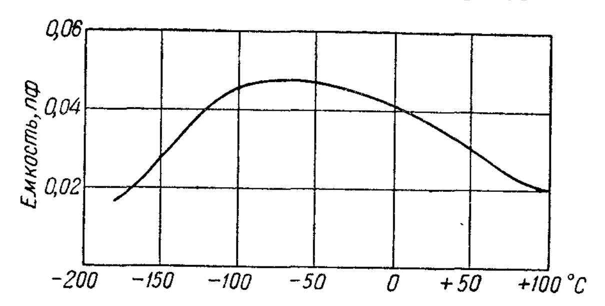


Рис. 8-6. Зависимость емкости от температуры для конденсатора из керамики типа К3000 фирмы «Плесси».

Зависимость емкости подобного конденсатора от температуры приведена на рис. 8-6.

Приложение к конденсатору большой постоянной составляющей напряжения уменьшает емкость и сглаживает

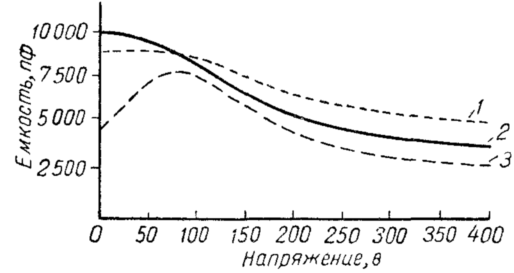


Рис. 8-7. Зависимость емкости от напряжения для конденсатора из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью.

1 — при температуре выше точки Кюри; 2 — при температуре, равной точке Кюри; 3 — при температуре ниже точки Кюри.

кривую зависимости емкости от температуры. При этом величина наблюдаемых изменений зависит от того, при какой температуре работает конденсатор: при температуре, равной точке Кюри, или же при температурах выше или ниже этого значения. Влияние постоянного напряжения

на емкость показано на рис. 8-7 в виде типичных кривых. Изменение емкости с температурой при различной величине приложенного напряжения изображено на рис. 8-8.

Потери в конденсаторах из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью. Конденсаторы, изготовленные из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью, обладают при комнатной температуре сегнетоэлектрическими свойствами, а именно: заряд и напряжение связаны нелинейной зависимостью, причем петля гистерезиса, описываемая во время зарядного цикла, похожа на петлю намагничивания для железа. Наличие сегнетоэлектрических

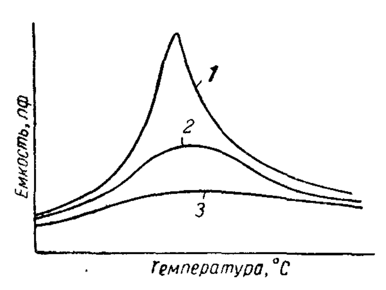


Рис. 8-8. Влияние напряжения на температурный ход емкости для конденсатора из керамики с высокой ε.

1 — напряжение равно нулю; 2 — напряжение 250 в; 3 — напряжение 500 в.

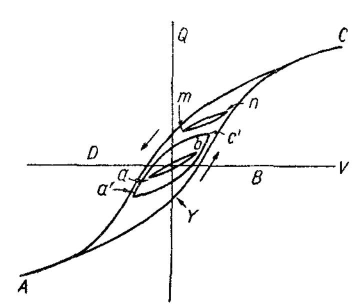


Рис. 8-9. Типичные петли гистерезиса для ферроэлектрика.

свойств ограничивает использование таких материалов в качестве диэлектриков. Эти свойства иллюстрирует рис. 8-9, на котором изображен общий характер кривых зависимости заряда от напряжения.

При больших изменениях напряжения получается кривая *ABCD*. Энергия, рассеиваемая за цикл, равна

$$\int U\,dQ,$$

где U — приложенное напряжение;

Q — заряд.

Иными словами, энергия потерь определяется площадью, заключенной внутри петли. Следовательно, при приложении большого переменного напряжения образец будет рассеивать значительное количество энергии. Более того, он будет вызывать значительное искажение формы кривой напряжения и появление высших гармоник. При малом

переменном напряжении конденсатор ведет себя «нормально», хотя коэффициент мощности велик, порядка 1%. Рабочий цикл характеризуется узкой петлей *ab*, как показано на диаграмме. Последующее повышение напряжения «заставляет» кривую стремиться пересечь границу петли гистерезиса, что физически невозможно, а поэтому петля гистерезиса принимает форму кривой *a'c'*. На этой стадии потери резко возрастают. Из рис. 8-9 видно, что поляризация не исчезает при уничтожении поля: определенная остаточная поляризация сохраняется при нулевом напряжении. Она не создает внешнего поля при статических условиях, поскольку происходит ее нейтрализация поверхностными разрядами однако при использовании конденсаторов в тех случаях, когда требуется подобие в поведении двух одинаковых элементов, величина остаточной поляризации играет важную роль.

При воздействии сильных полей поведение конденсатора из керамики с высокой ε сильно отличается от поведения обычных конденсаторов и оказывается весьма сложным. Для него характерно следующее.

а) Одновременное воздействие переменного и постоянного электрических полей. До тех пор, пока постоянное поле недостаточно велико для того, чтобы вызвать насыщение образца, а амплитуда тока меньше коэрцитивной силы, изменение заряда с напряжением будет характеризоваться петлей *mn* на рис. 8-9. Предельная величина переменной составляющей и приращение емкости и коэффициента мощности мало зависят от величины постоянной составляющей, хотя емкость несколько снижается с ростом постоянного поля. Для больших переменных полей получится петля гистерезиса, если только постоянная составляющая не настолько велика, чтобы во всех случаях снизить суммарное поле ниже уровня напряжения насыщения. Для таких случаев постоянная составляющая может только смещать кривую вдоль оси напряжения, не изменяя ее формы.

б) Одновременное воздействие переменных полей различной частоты. В области малых полей образец ведет себя как обычный конденсатор. Если высокочастотное поле малой амплитуды накладывается на поле меньшей частоты, но значительно большей амплитуды, то описывается нормальная петля гистерезиса. Используя развертку *CRT*, при переменной скорости светового пятна можно получить модуляцию интенсивности следа на экране осциллографа,

когда обе частоты имеют простые соотношения, как показано на рис. 8-10,*а*.

Однако если амплитуда или частота высокочастотной составляющей напряжения увеличивается так, что в течение части ее цикла отношение $\frac{dU}{dt}$ изменяет знак, то петля гистерезиса уже не может быть охарактеризована однозначно. В этом случае при использовании развертки *CRT* мы получим картину, представленную на рис. 8-10, *б*. Эти простые примеры показывают сложность явлений, которые могут происходить в нелинейных конденсаторах.

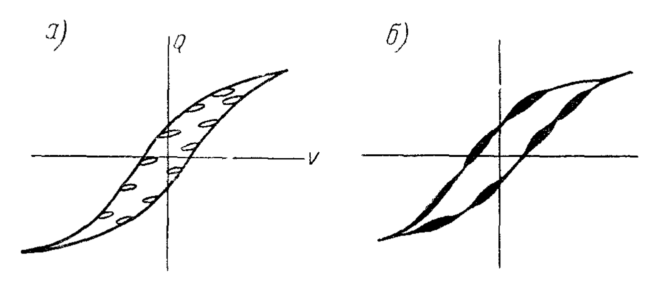


Рис. 8-10. Гистерезисные петли для сегнетокерамического конденсатора при наложении на него напряжений двух разных частот: *а* — наложение малого напряжения высокой частоты на большое напряжение низкой частоты; *б* — то же, при несколько увеличенном напряжении высокой частоты.

Все характеристики, описанные выше, зависят от температуры: петля гистерезиса сужается при повышении температуры и в конечном счете исчезает в точке Кюри. Выше этой точки образец ведет себя как диэлектрик с очень высокой диэлектрической проницаемостью; дальнейшее повышение температуры приводит к снижению ε. Простые составы с высоким содержанием титаната бария нельзя использовать в этом температурном интервале из-за больших потерь на проводимость. Новые промышленные материалы без ярко выраженной точки Кюри дают заметно улучшенные значения коэффициента потерь и сниженную проводимость при высоких температурах.

Таким образом, когда постоянная составляющая или переменное поле имеют высокое значение или когда требуется работа в широком интервале температур, применять

конденсаторы из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью можно лишь с большой осторожностью.

«Ползучесть» в конденсаторах из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью. Явление, характерное для конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью, носит название «ползучести». Оно заключается в изменении внутреннего сопротивления со временем и становится заметным при высоких температурах (свыше 100° С). Это явление не связано с обычным током утечки. При температуре свыше 100° С снижение внутреннего сопротивления может быть весьма значительным.

В соответствии с исследованиями, проведенными лабораторией Государственного колледжа штата Пенсильвания, значительное снижение тока утечки, а также улучшение других параметров можно получить при введении примесей. Стабильность диэлектрика можно охарактеризовать следующими независимыми параметрами: допускаемой напряженностью поля, *кв/мм*; сроком службы, *ч*; температурой, °С.

Допускаемая напряженность поля для материалов, пригодных к использованию, должна быть не менее 1,2 *кв/мм* при сроке службы 1000 *ч*. При этом значении напряженности и срока службы удалось повысить рабочую температуру от 150 до 275° С. При проведении дополнительных работ в данном направлении представляется возможным достичь температуры 300° С. Развитие этой работы основывалось на гипотезе, что процесс старения титановых диэлектриков имеет электрическую природу; при этом подвижными ионами являются свободные вакансии в кислородной решетке, называемые анионными вакансиями (АВ). Хотя эта гипотеза еще не подтверждена полностью, но сделанные на ее основе выводы согласуются с экспериментальными данными.

Если вещество можно получить гомогенным и если образование АВ у анода и их уничтожение у катода будет происходить с одной и той же скоростью, то никаких вредных последствий не окажется. В результате только ионный ток будет накладываться на преобладающий электронный ток образца. Вредный эффект от движения АВ возникнет только в негомогенных материалах.

Используемый метод стабилизации основан на введении в диэлектрик электронных доноров с целью значительного снижения концентрации АВ. Избираемый донор должен иметь соответствующие валентность и уровень концентра-

ции. Используя этот метод, удалось улучшить такие параметры, как зависимость электропроводности от времени при 325° C и зависимость tg δ от температуры, а также ослабить снижение диэлектрической проницаемости с температурой для материалов типов К2000 и К6000 (вещества на основе $BaTiO_3$). Также была существенно снижена скорость старения для материала К2000: изменение потерь за 10 дней старения было снижено с 23 до 2,58, а соответствующее изменение диэлектрической проницаемости — с 5,7 до 1,0%.

Типы конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью

Большинство конденсаторов этой группы изготовляют в форме дисков или трубок с применением методов производства, близких к тем, которые используются при изготовлении дисковых и трубчатых конденсаторов из керамики с малыми потерями.

Опорные конденсаторы, как изолированного, так и неизолированного типа, изготовляют для экономии места и обеспечения большей эффективности развязки. Эти конденсаторы в связи с их низкой индуктивностью имеют высокую резонансную частоту, что делает их особенно удобными для работы при ультравысокой частоте. Резонансная частота конденсатора для заданного типа конструкции зависит от длины проводников и величины емкости. Чем короче вывод и чем меньше емкость, тем выше резонансная частота. Например, типичный конденсатор емкостью 300 *пф* с длиной вывода 5 *мм* имеет резонансную частоту порядка 80 *Мгц*.

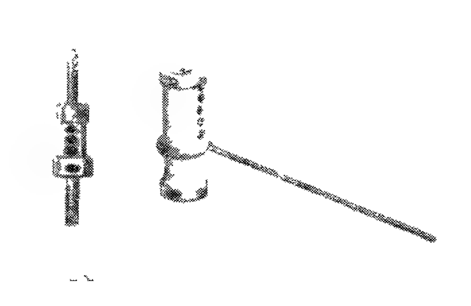


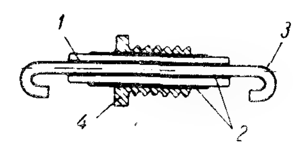
Рис. 8-11. Типичные опорные керамические конденсаторы фирмы «Эри».

Опорные конденсаторы, изготовленные из термокомпенсирующих диэлектриков (со средней величиной диэлектрической проницаемости), можно применять в радиочастотных настроенных контурах. Пределы их емкости ограничены, так

как используются материалы с более низкой диэлектрической проницаемостью. Конструкция такого конденсатора видна из рис. 8-11.

Изготовляют также проходные конденсаторы, в которых конденсатор становится составной частью металлического шасси, — он вмонтирован в шасси, и это упрощает проблему заземления при радиочастотах. Индуктивность выводов практически устраняется, так как физические размеры конденсатора малы и индуктивность включена последовательно с внутренними электродами. Типичная конструкция приведена на рис. 8-12.

Дисковые конденсаторы, защищенные компаундом или запаянные в керамический корпус, изготовляют в миниатюрном или субминиатюрном исполнении и используют в тех случаях, которые позволяют включение в схему между заданными точками, например при использовании в полосе промежуточных частот, когда желательно иметь малую длину соединительных проводников. Все эти типы обычно используют для шунтирования в радиочастотных контурах малой емкости.



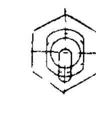


Рис. 8-12. Конструкция проходного керамического конденсатора.

1 — керамическая лакированная трубка; *2* — серебряные обкладки; *3* — проходной проводник; *4* — втулка с нарезкой.

Если необходима емкость большей величины, чем та, которую может дать цилиндрический или дисковый тип, то используют плоский пластинчатый тип. Были разработаны машины для изготовления очень тонких пленок методом отлива лент. Этот метод сводится к следующему.

Керамическую массу, приготовленную так, как указано выше, пропускают через мундштук на ленту из нержавеющей стали, которая медленно движется со скоростью порядка 1—2 *мм*. Керамический шликер приготовляют очень тщательно и размалывают в шаровой мельнице по крайней мере в течение 24 *ч*. Для получения тонких пленок очень важна именно тщательность перемешивания и размола в шаровой мельнице. После этого материал пропускают обычно через сито 300 *меш*.

В течение всего процесса производства необходимо поддерживать исключительную чистоту. Шликер вырав-

нивается на ленте специальным валиком. Отлитая пленка проходит через сушильную печь, где высушивается настолько, чтобы можно было отделить ее от ленты и разрезать на пластинки необходимого размера. После этого пластинки обжигают на подставках из двуокиси циркония или подобного ему материала с предварительным прогревом в течение 4—5 *ч*, выдержкой в течение 1 *ч* при максимальной температуре и охлаждением в течение 3—4 *ч*.

По другому методу шликер заливают в маленькую коробку без дна, установленную на стеклянную пластину и имеющую боковую щель. Коробка перемещается по поверхности стекла, оставляя на ней тонкий слой массы; толщина слоя регулируется высотой щели и скоростью перемещения коробки. Скорость перемещения должна быть абсолютно постоянной. Этот метод используют для получения пленок толщиной до 50 *мк*.

Основная трудность получения таких тонких керамических пластинок заключается в том, что они часто искривляются при обжиге; это мешает их сборке в пакеты при изготовлении многопластинчатых конденсаторов. Пластинки серебрят методом вжигания, причем обжиг производится после сборки в стопки. В тех случаях, когда необходима высокая рабочая температура, для металлизации применяют пасты на основе палладия или платины.

Перед припайкой выводов к электродам стопки металлизированных пластинок предварительно прогревают, чтобы предотвратить растрескивание от теплового удара.

Другой метод получения тонких пленок для изготовления малогабаритных низковольтных конденсаторов используют в производстве конденсаторов типа «Церафил» (фирма «Аэровокс»). По этому методу диэлектрик выдавливают экструзионным способом в виде цилиндрического бруска, который используют далее в качестве основания конденсатора. Необходимо, чтобы материал основания имел те же самые физические свойства, что и тонкая пленка диэлектрика. Основание помещают в держатель и погружают последовательно в жидкую пасту, содержащую порошкообразный палладий, в шликер (диэлектрик) и в жидкую серебряную пасту для получения тонких чередующихся слоев этих материалов. Глубину погружения основания каждый раз строго контролируют с таким расчетом, чтобы первый электрод выступал за пределы пленки диэлектрика и позволял присоединять к нему вывод. Между

этими погружениями проводят сушку, запекание или обжиг заготовок. К двум проводящим пленкам, служащим электродами, присоединяют выводы. После этого конденсатор опрессовывают формальдегидной пластмассой. Для получения больших емкостей отдельные секции соединяют параллельно в пакет до опрессовки пластмассой.

Керамические конденсаторы для радиопередатчиков

Керамические конденсаторы разрабатываются также с целью использования их в генераторах средней мощности и в цепях радиопередатчиков. Высокая стабильность и малые по сравнению с воздушными конденсаторами размеры делают их пригодными для использования в колебательных контурах, а также для шунтирования, блокировки и связи между контурами. Очень ценным качеством этих конденсаторов является их способность, не разрушаясь, выдерживать высокие напряжения.

При воздействии высокого напряжения может возникнуть повышенная напряженность поля на краях обкладок. Для работы при напряжении свыше 3,5 *кв* конденсаторы изготовляют с глазурованным керамическим кольцом («юбкой»), снижающим напряженность поля на краях обкладок и устраняющим потери на корону, которые могут привести к преждевременному пробою.

Форма и расположение обкладок определяются размерами кольца; подгонка емкости таких конденсаторов невозможна, так как неизбежное при шлифовке удаление части слоя серебра в данном случае недопустимо.

Стандартные отклонения емкости от номинала составляют ±10%, но можно изготовлять конденсаторы и с допуском ±5%. Обкладки наносят вжиганием слоя серебра необходимой толщины с высокой электропроводностью, допускающего нагрузку большим током. К обкладкам припаивают выводные металлические пластины, причем площадь контакта вывода с обкладкой должна быть достаточно большой, чтобы исключить возможность локального нагрева при полной нагрузке конденсатора рабочим током.

Дисковый тип конструкции применяют при небольших значениях реактивной мощности, а трубчатый — при больших значениях. В тех случаях, когда требуется более высокое напряжение, больший номинальный ток или бóльшая реактивная мощность, чем это допускает единичный кон-

денсатор, используют конденсаторные батареи, составленные из последовательно или параллельно-последовательно соединенных единиц.

При высоком напряжении и большой реактивной мощности применяют трубчатые конденсаторы в виде керамической толстостенной трубки с глазурованными «юбками» с обоих концов. Такая открытая трубчатая конструкция допускает как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение в тех случаях, когда требуется повышенное значение реактивной мощности.

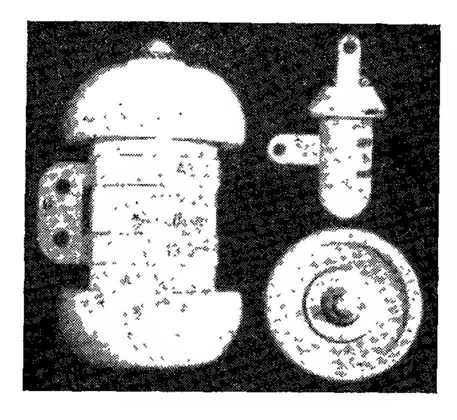


Рис. 8-13. Типичные керамические конденсаторы для радиопередающей аппаратуры, изготовленные фирмой «Аэровокс».

Конденсаторы дискового типа, выпускаемые в США, имеют следующие электрические характеристики:

Величина емкости	25 *пф* ± 10%
Номинальное напряжение (постоянная составляющая и амплитуда составляющей высокой частоты)	5 *кв*
Номинальный ток	5 *а*
Температурный коэффициент (в диапазоне температур от —40 до +75° С)	NO30... $(+30 \div -45) \times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Сопротивление изоляции (при 500 *в* постоянного тока и 25° С)	Более 50000 *Мом*
Добротность при 1 *Мгц*	1125
Емкость при 1 *Мгц*	25,06 *пф*
Изменение емкости в интервале температур от —40 до +75° С	0,019 *пф*
Испытательное напряжение	7,5 *кв*
Повышение температуры при номинальном токе (0,32 *а*) и 1 *Мгц*	7,5° С
Сопротивление изоляции при 105° С (после 1000 *ч* пребывания при 105° С и максимальном напряжении)	Более 50000 *Мом*

Типичные конденсаторы описанных здесь конструкций показаны на рис. 8-13.

Бентонитовые конденсаторы

Бентонитовая глина, химически подобная слюде, добывается в различных частях света. Из производных бентонитовой глины можно получать электроизоляциоинную пленку. К преимуществам такой пленки относятся: высокая электрическая прочность, низкая абсорбция, механическая и электрическая стабильность в широком интервале температур.

Электрическая прочность пленок, изготовляемых в США, составляет около 400 *кв мм* (амплитудное напряжение при частоте 60 *гц*) при испытании между шаровыми электродами в масле при толщине пленки 25 *мк*.

Материал хрупок, несжимаем и ведет себя в значительной степени подобно пластинке стекла с такой же толщиной. При выдержке пленки в условиях повышенной влажности ее коэффициент мощности ухудшается. Бентонитовая пленка «амплифильм», изготовляемая в США фирмой «Эйркрафт марин продэктс» (АМР), имеет следующие свойства:

Толщина	12,5 ± 2,5 *мк*
Температурный коэффициент емкости (в интервале температур от — 55 до + 125° С) на 1° С	0,015 %
Диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур от — 55 до + 125° С	$\varepsilon = 4,3$
Коэффициент мощности при 25° С:	
при 1 *кгц*	0,0023
при 1 *Мгц*	0,0017
Удельное объемное сопротивление	10^{15} *ом · см*
Пробивная напряженность (в пределах температуры от — 55 до —175° С):	
при толщине 25 *мк*	200 *кв/мм*
при толщине 50 *мк*	160 *кв/мм*
Химическая стабильность	Стабильна до 250° С
Короностойкость	Хорошая
Физические свойства	Нерастворима Неупруга Несжимаема

В настоящее время бентонитовые конденсаторы применяют в импульсной технике в качестве высоковольтных импульсных конденсаторов (иногда их используют в цепях формирования импульсов) и фильтровых конденсаторов для радиолокационных модуляторов и индикаторов. Приводим характеристики таких конденсаторов (данные фирмы АМР):

Интервал емкостей	От 25 до 100 000 *пф*
Отклонение емкости от номинала	± 5%
Номинальное напряжение (при температуре от — 25 до + 125° С):	
импульсное	До 9 *кв*
напряжение постоянного тока	До 11,5 *кв*
Коэффициент мощности (при 25° С и 60 *гц*):	
среднее значение	0,35%
максимальное значение	0,5%
Постоянная времени:	
при 25° С	100 000 *Мом·мкф*
при 125° С	50 *Мом·мкф*
Изменение емкости с частотой от 1 *кгц* до 10000 *кгц*	± 1%
Изменение емкости в интервале температур от —55 до + 125° С	± 3%

Конденсаторы набирают в виде стопок из листков толстой медной фольги и бентонитовых пластинок. Затем собранную стопку под воздействием высокой температуры и давления опрессовывают термопластичной пластмассой.

В тех случаях, когда масляное наполнение не применяется (например, используется пластмассовая опрессовка), надо принимать меры к устранению ионизации (короны).

СТЕКЛЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Стекло рассматривается как «переохлажденный жидкий раствор», а также как «неорганический продукт расплава, который охлажден до жидкого состояния без кристаллизации». Используют много типов и разновидностей стекла, число которых сейчас составляет около 500—600. Оконное и промышленные стекла состоят в основном из двуокиси кремния в виде песка, сплавленного в прозрачную массу с помощью легкоплавких окислов, назначение которых — снизить температуру плавления смеси. Свойства основного материала могут быть приспособлены к специальным требованиям введением одного или нескольких из многих окислов и некоторых других соединений; так, добавка окиси алюминия улучшает механическую прочность, окись свинца изменяет оптические характеристики, а окись бора увеличивает сопротивляемость термическим ударам. Эти и другие результаты можно получить умелым смешением компонентов, используемых в производстве стекла.

Стекло, подвергавшееся нагреву и обработке, охлаждается в напряженном состоянии; если его снова нагреть

до температуры, близкой к температуре размягчения, но не достигать последней, то внутренние напряжения в стекле исчезнут, и оно станет отожженным. Температуры, в интервале которых проходит это явление, известны под названием интервала отжига; не существует определенного значения температуры, при котором стекло внезапно размягчается или плавится. На практике «точку размягчения» рассматривают как температуру, при которой стекло может быть деформировано без растрескивания.

Стекло, выдержанное в течение длительного времени при высокой температуре, может претерпеть молекулярную и атомную перегруппировку и стать кристаллическим — пройти стадию расстеклования.

Точка плавления двуокиси кремния изменяется в соответствии с формой, в которой используется этот материал. Обычно она находится между 1600 и 1700° С. Столь высокая температура неудобна для промышленного использования, поэтому точку плавления значительно понижают путем введения окислов (обычно в виде карбонатов) щелочных металлов. Силикаты щелочных металлов, или щелочные стекла, сами по себе нестабильны во времени, легко подвергаются воздействию самых слабых химикатов и часто растворяются в воде. Необходимую стабильность материала легко получить введением некоторого количества извести или магнезии; при этом температура размягчения остается низкой.

Стекла с малыми потерями, имеющие также низкий температурный коэффициент и удовлетворительное значение диэлектрической проницаемости, были разработаны для применения в качестве конденсаторных диэлектриков. Электротехническое стекло должно содержать малое количество или совершенно не иметь в своей основе окислов щелочных металлов. Значительное количество стекла, применяемого в электротехнике, содержит в качестве флюса окись бора. Такие стекла называются боросиликатными стеклами.

Из известных стекол наиболее низки потери у чистого плавленого кварца, для которого $\operatorname{tg} \delta = 0{,}000115$. Боросиликатные стекла, содержащие не более 4% окислов щелочных металлов, имеют $\operatorname{tg} \delta$ порядка 0,005—0,007 при 1 *Мгц*; диэлектрическая проницаемость их равна 4—18. Коэффициент мощности стекол обычно возрастает при увеличении температуры, причем при низких частотах рост его с темпера-

турой сильнее, чем при высоких частотах. Ниже приведен результат измерений при частоте 500 *кгц* для химически стойкого стекла пирекс, которое получил Хох:

t, °C	20	74	125
Cos φ	0,0042	0,007	0,12
ε	4,9	5,0	5,0

Диэлектрическая проницаемость различных стекол находится в пределах от 3,7 (для чистого кварцевого стекла) до 18—20. Наиболее высокую диэлектрическую проницаемость имеют стекла, содержащие окислы свинца, калия и кремния. Для теллурового стекла получено значение $\varepsilon = 26$ при малом угле потерь.

Для высокочастотных конденсаторов применяют стекла, содержащие окись одного из тяжелых металлов (барий, стронций или свинец). Если применять и щелочной металл, то преимущество отдается калию. Стекла такого рода имеют относительно высокую ε при удовлетворительно малом значении коэффициента мощности. Боросиликатные стекла изготовляют в настоящее время с относительно низкими величинами температурного коэффициента диэлектрической проницаемости, малым углом потерь и с высоким удельным сопротивлением; эти стекла характеризуются также низким температурным коэффициентом расширения порядка $(3{,}2 \div 4{,}0) \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Поверхность их устойчива против химического и атмосферного воздействия; кроме того, стекла имеют хорошую тепловую стабильность; температурный коэффициент диэлектрической проницаемости положителен и снижается при повышенных частотах.

Электрическая прочность стекла высока, но уменьшается с ростом температуры и частоты, а также со временем воздействия напряжения.

Конструкция и технология изготовления стеклянных конденсаторов

Преимуществами стеклянных конденсаторов являются широкий диапазон рабочих температур (от —55 до +200°C), низкий коэффициент мощности, высокое сопротивление изоляции и высокая электрическая прочность по сравнению со слюдой, особенно при высоких температурах. Изменение емкости с температурой обратимо или циклично, а температурный коэффициент емкости очень мал.

Существуют два метода изготовления стеклянных конденсаторов. Выбор метода зависит от масштабов выпуска. В обоих случаях гибкая стеклянная лента получается непрерывным процессом, методом экструзии. Далее можно изготовлять конденсаторы одним из следующих методов:

1) стекло нарезáть на пластинки заданного размера и из таких пластинок, чередуя их с листками фольги, набирать вручную многопластинчатые секции в виде стопок;

2) стеклянную ленту и рулонную фольгу подавать на автомат, обеспечивающий механизированную сборку секций.

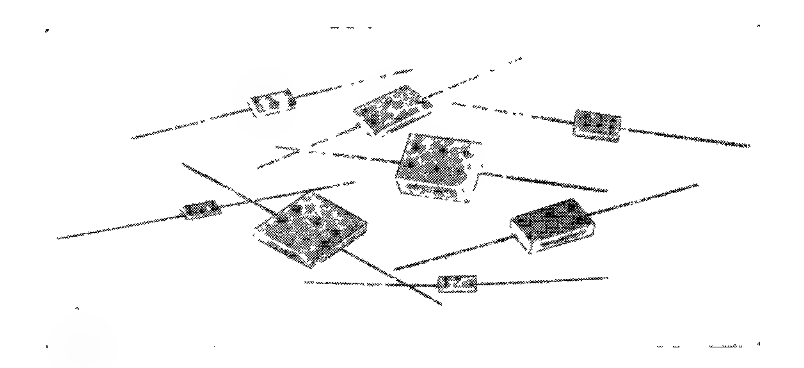


Рис. 8-14. Типичные стеклянные конденсаторы фирмы «Корнинг гласс».

В процессе сборки стеклянных пластинок и листков металлической фольги разноименные обкладки сдвигают в противоположные стороны, за пределы края стеклянной ленты. Выводы присоединяют к алюминиевой фольге (к обкладкам) точечной сваркой выступающих краев фольги с серебрёной или луженой медной проволокой. Собранную секцию помещают между двумя стеклянными пластинками увеличенной толщины, размеры которой достаточны для того, чтобы перекрыть секцию со всех сторон. Далее секцию помещают в печь, где она спекается в монолитный блок.

Обкладки конденсатора должны быть изготовлены из алюминия. Медь не может быть использована из-за ее окисления. Применение серебра затруднено его диффузией в стекло с образованием при температурах выше 600° С желтого силиката серебра. Можно использовать золото в виде тонкой фольги. Конденсаторы с золотой фольгой допускают

нагрев в воздушной среде, но при использовании алюминия необходимо вести нагрев при спекании в атмосфере азота.

Важным преимуществом стеклянных конденсаторов является возможность применять для заделки секций тот же тип стекла с низким коэффициентом потерь, который используется в качестве основного диэлектрика. Нет необходимости помещать конденсатор в корпус из пластмассы или другого материала, потери которых выше, чем у основного диэлектрика. Типичные стеклянные конденсаторы показаны на рис. 8-14. Однако осуществление такой конструкции связано с некоторыми трудностями. Так как стекло не имеет достаточной адгезии к материалу выводов, то существуют пути для проникновения влаги. Пропитка кремнийорганической жидкостью, которая недостаточно устойчива в некоторых условиях, тоже не обеспечивает полной водостойкости.

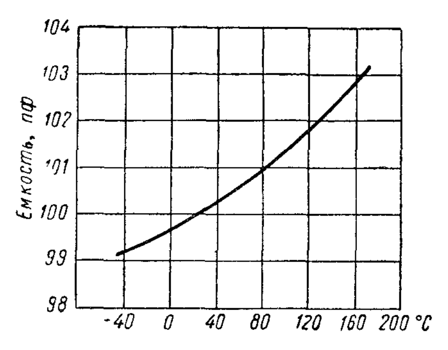


Рис. 8-15. Зависимость емкости стеклянного конденсатора от температуры.

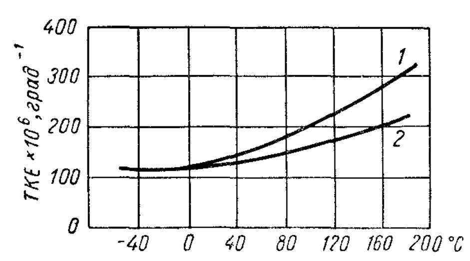


Рис. 8-16. Температурная зависимость температурного коэффициента емкости для стеклянного конденсатора.

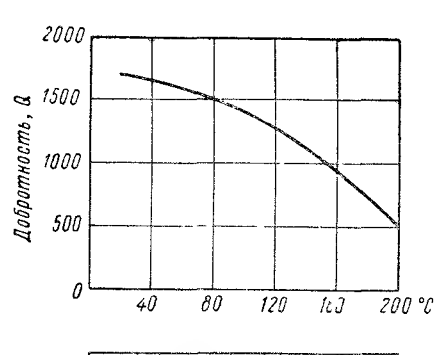
1 — ТКЕ подсчитан для заданного значения температуры; 2 — ТКЕ подсчитан как среднее значение для интервала температур от +25° С до заданной.

Фирма «Корнинг гласс» внедряет новый тип «запеченного» герметизированного конденсатора. Такие конденсаторы имеют приваренные выводы из омедненного железоникелевого сплава, облуженного горячим способом. Эта конструкция обеспечивает полную герметичность в местах соединения стекла с металлом.

Изменение емкости с температурой показано на рис. 8-15, а на рис. 8-16 приведена зависимость температурного

коэффициента емкости от температуры, полученная расчетом по кривой рис. 8-15.

Объемное сопротивление, как и для большинства неорганических изоляционных материалов, уменьшается с увеличением температуры приблизительно по экспоненте. Типичные стеклянные конденсаторы емкостью 10 000 *пф* для рабочего напряжения 300 *в* постоянного тока имеют сопротивление изоляции свыше 50 000 *Мом* при 25° С; эта характеристика уменьшается приблизительно до 115 *Мом* при 175° С. Зависимость добротности *Q* от температуры и от номинальной емкости представлена графически на рис. 8-17.



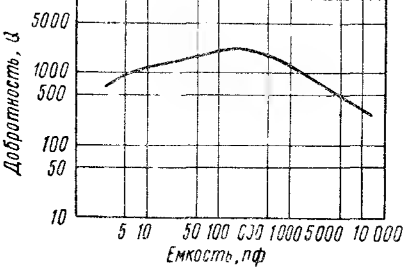


Рис. 8-17. Зависимость добротности стеклянного конденсатора фирмы «Корнинг гласс»: *а* — от температуры при частоте 1 *Мгц*; *б* — от номинальной емкости.

Были разработаны опытные образцы стеклянных конденсаторов для замены слюдяных конденсаторов средней и большой реактивной мощности.

Основная конструкция типовых конденсаторов средней мощности для замены слюдяных конденсаторов типов MIL-C-5, СМ75—СМ95 подобна вышеописанным типам с аксиально направленными выводами.

При изготовлении конденсаторов высокого напряжения применяют экранирующую фольгу, которая обеспечивает последовательное включение элементов. Отдельные секции спаивают вместе, параллельно, используя «стеклянный припой». Параллельное соединение секций облегчает подгонку емкости конденсатора к номинальному значению. В случае необходимости можно использовать дополнительную фольгу для того, чтобы отвести тепло к выводам конден-

сатора, а следовательно, и в окружающую среду. Два типа конденсаторов, собираемых из нескольких параллельно соединенных секций, перекрывают два порядка значений емкости.

Семь или восемь типов конденсаторных секций применяют при низком номинальном напряжении. Такое же число типов применяют и для более высоких напряжений. Ограничивающим фактором для секций малой емкости является возникновение короны; при радиочастотах на каждую последовательно включенную секцию можно допускать напряжение не более 300 *в*.

Нет необходимости ограничивать рабочую температуру этих конденсаторов значением 85° С (температура окружающей среды 70° С плюс перегрев 15° С), так как они удовлетворительно работают при нагреве до 125° С (температура окружающей среды плюс перегрев). Исключением могут быть только те случаи, когда температурный коэффициент емкости или диэлектрические потери являются ограничивающим фактором.

Индуктивность конденсаторов весьма мала, а потому собственная резонансная частота намного выше, чем у слюдяных конденсаторов. Резонансная частота порядка 100 *Мгц* получена для стеклянных конденсаторов емкостью 800 *пф*, в то время как емкость слюдяных конденсаторов при этом значении резонансной частоты равна лишь 100 *пф*. Эта характеристика делает стеклянные конденсаторы более пригодными для работы при высоких частотах.

Конденсаторы большой мощности, заменители слюдяных конденсаторов типов СМ75—СМ95 собирают путем последовательного или параллельно-последовательного соединения конденсаторов средней мощности. После этого их заливают воскообразным компаундом в типовом корпусе, применяемом для слюдяных конденсаторов типов СМ75—СМ95. Учитывая высокие номинальные токи, последовательное и последовательно-параллельное соединение секций осуществляют с помощью шин из полосовой меди.

СТЕКЛОЭМАЛЕВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Были разработаны конденсаторы из чередующихся слоев стеклоэмали и металлических обкладок, нанесенных распылением, с подсушкой после нанесения каждого слоя. Исходная эмаль, используемая в качестве диэлектрика,

представляет собой полужидкую смесь такой консистенции, которая пригодна для распыления. Она состоит из окиси кремния, щелочных окислов и фторидов, окиси свинца и других окислов.

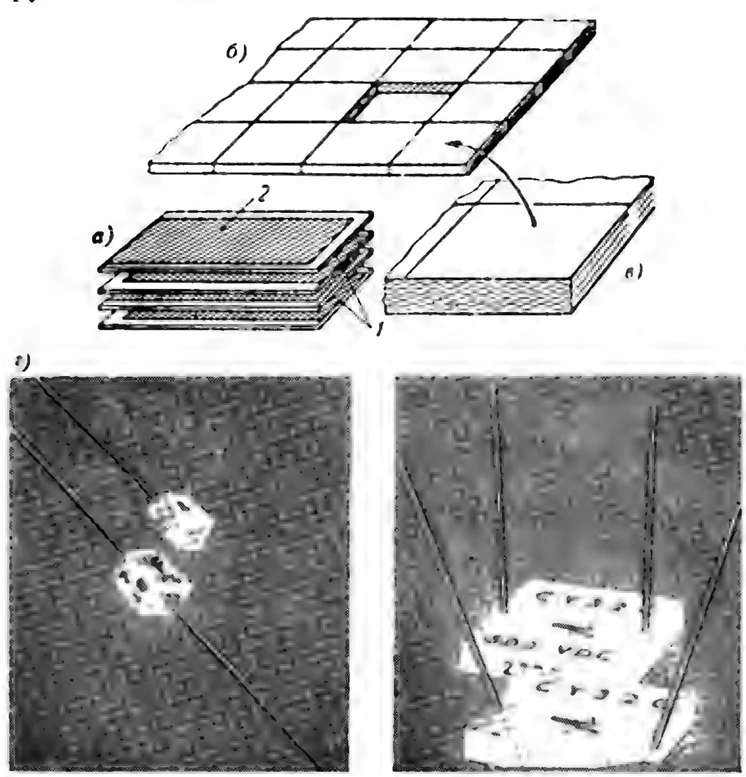


Рис. 8-18. Стеклоэмалевые конденсаторы фирмы «Витрамон»: *а* — схема образования конденсатора.

1 — диэлектрик; *2* — обкладки.
б — пластина-заготовка на несколько единичных конденсаторов; *в* — единичный конденсатор в увеличенном виде до его вырезки из заготовки; *г* — внешний вид конденсаторов.

Можно одновременно изготовлять несколько конденсаторов, если производить распыление на большой площади с последующей разрезкой на отдельные секции, как показано на рис. 8-18.

При распылении металлизирующей пасты применяют экраны, рассчитанные таким образом, чтобы серебряные

электроды поочередно выходили к двум противоположным торцам секции. После разрезки заготовки проходят операцию спекания, и к ним припаивают выводы.

Характеристики конденсаторов, изготовленных этим способом, достаточно высоки. Температурный коэффициент емкости положителен и равен примерно $115 \cdot 10^{6}$ *град*^{1}; конденсаторы могут работать при напряжении 500 *в* и имеют удельную емкость порядка 600 *пф см*^{3}. Ток утечки мал вплоть до температуры 150° С; продолжительное время конденсаторы могут работать при температуре до 85° С. Изменение характеристик в диапазоне радиочастот сравнимо со слюдяными конденсаторами. Стеклоэмалевые конденсаторы хорошо противостоят воздействию климатических условий, обратимость характеристик у них хорошая.

В США фирма «Спрейг электрик» разработала новый вид конденсаторов, используя при той же технологии изготовления добавку к стеклу керамических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью или термокомпенсирующими характеристиками (стеклокерамические конденсаторы).

В Англии стеклоэмалевые конденсаторы под фирменным названием «Витрикон» выпускает фирма «Электролэбораторис Велвин». Технология производства своеобразна; она представляет собой нечто среднее между производством стекла и керамики и похожа на технологию покрытия эмалью при изготовлении проволочных сопротивлений.

В процессе изготовления стеклоэмалевых конденсаторов фольгу покрывают фриттой, составленной из стеклянного порошка, после чего глазуруют до сборки. Далее глазурованные листки фольги укладывают в стопку до получения нужной величины емкости и затем сплавляют вместе под давлением в монолитный блок из чередующихся слоев металла и диэлектрика. После присоединения выводов полученную заготовку дополнительно покрывают эмалью для полной влагозащиты конденсатора.

Используется ряд изоляционных эмалей, которые имеют различное сочетание характеристик. Например, можно получить эмаль с ε до 120, регулируемым температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости и коэффициентом мощности не более 0,003.

Другими крайними значениями являются: $\varepsilon = 20$, нулевой температурный коэффициент диэлектрической про-

ницаемости и коэффициент мощности порядка 0,0005. В пределах этого диапазона можно получить эмали с любыми характеристиками. Точка плавления изоляционных эмалей лежит между 500 и 600° С. Для большинства рецептур таких эмалей верхний предел рабочей температуры равен 200° С, а в некоторых случаях может достигать 250° С. Предел рабочей температуры установлен условно, так как опасность разрушения образца отсутствует, и приходится лишь учитывать снижение сопротивления изоляции с увеличением температуры.

Эмали выбирают таким образом, чтобы температурные коэффициенты расширения эмали и металла используемой фольги были равными; тогда при значительных изменениях температуры механические напряжения в конденсаторе будут малыми. В связи с этим стеклоэмалевые конденсаторы пригодны для работы при весьма высоких и низких температурах и выдерживают значительные тепловые удары.

Эмали, применяемые в качестве диэлектрика, не очень влагостойки, и главным образом по этой причине приходится покрывать конденсаторы защитным слоем специальной более влагостойкой эмали. Стеклоэмалевые конденсаторы с такой влагозащитой выдерживают сто климатических циклов без ухудшения сопротивления изоляции, которое остается равным примерно 10^{12} *ом*. В качестве примера работоспособности стеклоэмалевых конденсаторов можно указать, что в течение 1000 *ч* при температуре 150° С они выдерживают воздействие постоянного напряжения, на 50% превышающего номинальное значение.

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ СИЛИКАТА МАГНИЯ

В опытных образцах конденсаторов, изготовленных голландской фирмой «Филипс», внутренний металлический электрод помещен в трубку из силиката магния, на которую туго надета внешняя металлическая трубка. Такую заготовку нагревают, вытягивают, подобно проволоке, до получения нужного номинала и после этого режут на куски определенной длины для получения заданной емкости. Небольшую часть внешнего электрода зачищают для присоединения вывода к внутреннему электроду.

Опытные образцы таких конденсаторов емкостью 100 *пф* имеют длину около 44,5 *мм* и диаметр 0,8 *мм*.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ПОЛИСТИРОЛЬНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Наиболее важное свойство полистирольных конденсаторов — их исключительно высокое сопротивление изоляции. Эти конденсаторы также имеют исключительно низкую диэлектрическую абсорбцию, в результате чего они способны запасать электрический заряд и полностью отдавать его по мере надобности. Это свойство используется в радиочастотных настроенных контурах, прецизионных цепях времени, интегрирующих контурах, настроенных контурах с высокой добротностью, лабораторных образцовых емкостях и в цепях с высокой постоянной времени.

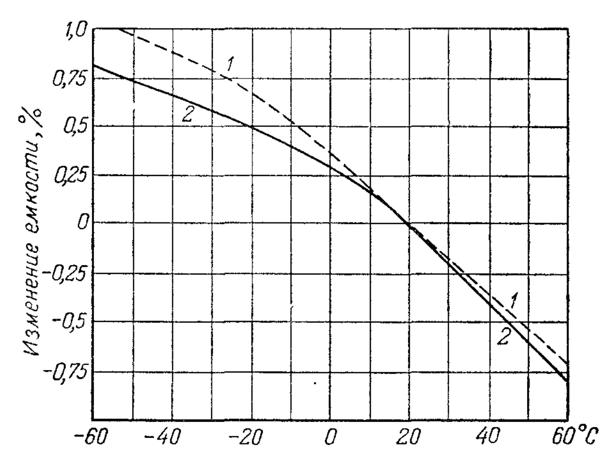


Рис. 9-1. Зависнмость емкости полистирольного конденсатора от температуры.

1 — номинальная емкость 0,1 *мкф*; 2 — номинальная емкость 0,2 *мкф*.

Величина коэффициента абсорбции в сравнении с другими диэлектриками очень мала. Коэффициент мощности также мал, порядка 0,0005 при 1 *кгц*. Емкость стабильна, ее температурный коэффициент лежит в пределах от —100 до —200 · 10 ^{6} *град*$^{-1}$. Как показано на рис. 9-1, небольшое изменение температурного коэффициента происходит при комнатной температуре.

Основной недостаток при использовании конденсаторов в военной технике — ограниченный интервал рабочих температур. Обычный верхний предел температуры равен 65° С, хотя некоторые типы конденсаторов малой емкости можно применять при температуре до 85° С.

Полистирольные пленки имеют следующие свойства:

Коэффициент мощности (cos φ) при частоте до 10^9 *гц*	0,0002—0,0005
Электрическая прочность:	
при толщине 75 *мк*	120 *кв/мм*
при толщине 50 *мк*	160 *кв/мм*
Диэлектрическая проницаемость при частоте до 10^9 *гц*	$\varepsilon \approx 2{,}5 \div 2{,}7$
Удельное поверхностное сопротивление	10^{16} *ом*
Удельное объемное сопротивлеиие	10^{17}—10^{19} *ом·см*
Удельный вес	1,05 *г/см*^{3}
Прочность при растяжении	770 *кГ/см*^{2}
Удлинение при разрыве ($t = 20°$ С)	4%
Температурный коэффициент линейного расширения	$100 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Температура размягчения	~85° С

Полистирол растворяется в бензоле, толуоле и ксилоле; его химическая формула:

$$\left(\begin{array}{c}\ldots -CH-CH_2- \ldots \\ | \\ C_6H_5\end{array}\right)_n .$$

Полистирольная пленка, используемая в конденсаторах, должна быть одинаковой толщины по всей длине и не иметь проколов. Для обеспечения этих требований пришлось преодолеть немало трудностей. Конденсаторную пленку изготовляют из гранулированного полистирола, выдавливая из разогретого полимера тонкостенную трубку, которую затем распрямляют, растягивают в двух направлениях под прямым углом и охлаждают в растянутом состоянии. Скорость охлаждения тщательно контролируют, причем используют обдувку воздухом. После этого процесса нитевидные молекулы полистирола располагаются преимущественно в плоскости пленки и при нормальных температурах остаются в таком положении в «замороженном» виде. Однако такая ориентация быстро ослабляется при температурах 90—100° С, и если пленка не натянута, то произойдет переориентация молекул и усадка пленки по площади с увеличением ее толщины. Емкость при этом уменьшится.

Чтобы стабилизировать емкость конденсаторов в процессе их изготовления, секции, намотанные из пленки с алю-

миниевыми фольговыми обкладками (рис. 9-2), подвергают тепловой обработке при температуре выше температуры релаксации. При этом пленка дает усадку, обеспечивается плотное прилегание ее к обкладке, устраняются воздушные включения между пленкой и обкладкой, а торцы секций спекаются. Все это улучшает стабильность конденсатора. Изготовленные таким путем конденсаторы часто называют

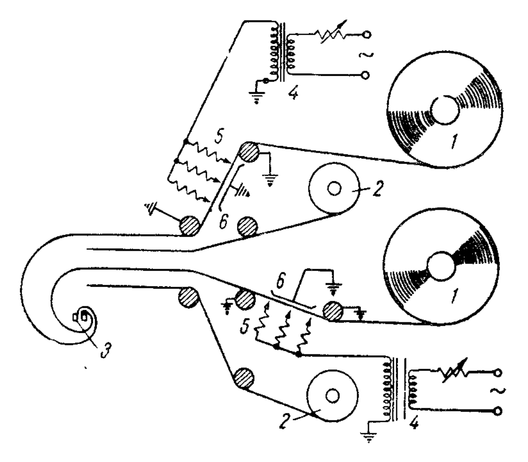


Рис. 9-2. Схема намоточного станка с приспособлением для устранения поверхностной электризации пленки.

1 — рулон с пленкой; *2* — рулон с фольгой; *3* — намоточная оправка; *4* — трансформатор на 10 *кв*; *5* — защитные сопротивления по 1 *Мом*; *6* — заземленные пластины.

«запеченными». В процессе намотки могут возникнуть определенные трудности, так как пленка приобретает статические заряды; эти заряды притягивают чужеродные частицы пыли, которые проникают в пленку и создают слабые места, где происходит затем пробой. Одним из методов преодоления этих трудностей является использование высоковольтного трансформатора, присоединяемого к металлической гребенке, зубцы которой обращены к пленке, и к гладкой металлической заземленной плате, расположенной под гребенкой. Приспособление такого вида для намотки пленочных конденсаторов показано на рис. 9-2.

Имеется несколько иных способов улучшения условий намотки. По одному из них намоточный станок помещают в коробку с прозрачными стенками, как показано на рис. 9-3. Другой, наиболее практичный путь — это создание специальных намоточных помещений с кондиционированным воздухом и контролем концентрации частиц пыли. Такое помещение показано на рис. 9-4. Для повышения электри-



Рис 9-3 Намоточный станок в защитном прозрачном чехле (фирма «Спрейг»).

ческой прочности конденсаторов полистирольную пленку наматывают в несколько слоев. В качестве обкладок наиболее пригодна алюминиевая фольга, но иногда используют также и оловянную фольгу. Очень важно создать хороший контакт между обкладкой и фольговыми выводами. В ряде случаев для обеспечения вполне надежного контакта вывод приваривают к обкладке.

На протяжении всего процесса производства конденсаторов рассматриваемого типа должна поддерживаться исключительная чистота. В частности, важно, чтобы исключалась возможность загрязнения пленки жиром, маслами или даже перхотью с головы работницы.

Для получения высокой добротности, низкого коэффициента потерь и высокого сопротивления изоляции кон-

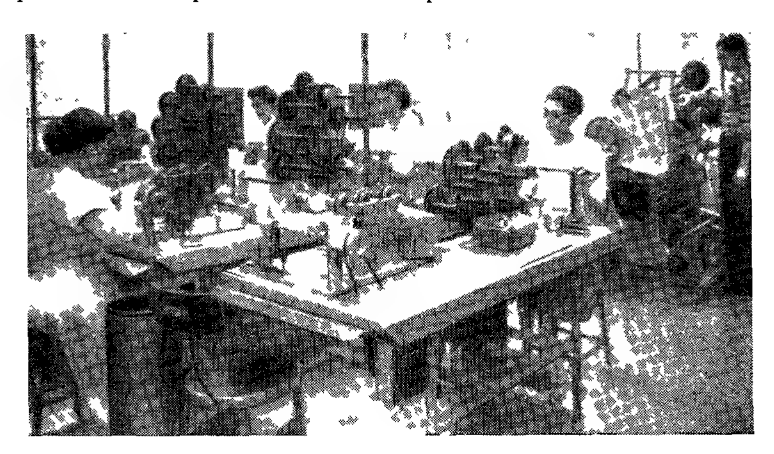


Рис 9 4 Общий вид намоточного помещения с кондиционированным воздухом для намотки пленочных конденсаторов.

денсаторные секции должны быть тщательно высушены до герметизации в корпусе. По конструкции полистирольные конденсаторы в общем близки к намотанным бумажным конденсаторам.

ПЛЕНКИ ИЗ АЦЕТАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Ацетат целлюлозы, хотя и уступает по электрическим характеристикам полистиролу, все же применяется для некоторых типов специальных конденсаторов. Однако во многих случаях вместо ацетата целлюлозы теперь применяется полиэтилентерефталат. Коэффициент мощности ацетата целлюлозы несколько выше, чем у бумаги (от 0,01 до 0,03 при 25° С и частоте 1 *кгц*), а диэлектрическая проницаемость составляет 3—4 и снижается с частотой. Ацетат целлюлозы не имеет каких-либо заметных преимуществ перед бумагой и поэтому никогда не использовался в больших количествах. Технология производства конденсаторов с бумажным диэлектриком была давно хорошо известна, и бумагу можно было легко получать в нужных количествах. В связи с перспективами развития и широкого использования полиэтилентерефталата применение ацетата целлюлозы в дальнейшем будет еще более ограничено.

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА (ТЕФЛОНА)

Тефлон — превосходный нагревостойкий материал, представляющий собой весьма перспективный диэлектрик с электрическими характеристиками, подобными характеристикам полистирола при нормальной температуре, но пригодный для использования примерно до 200° С. Существуют два метода изготовления тонких конденсаторных пленок из этого материала: срезание ленты с монолитного блока тефлона и отливка ленты из суспензии. Основными недостатками строганой пленки являются большое число сквозных отверстий и трудность изготовления пленки толщиной менее 50 *мк*. В связи с этим разработан суспензионный метод, по которому тщательно отполированную металлическую поверхность покрывают водной суспензией тефлона; это покрытие просушивают и спекают до образования непрерывной пленки. После охлаждения пленку снимают с подложки. Пленки, изготовленные таким способом, имеют меньше сквозных отверстий, чем пленки, полученные методом строгания. Пробивное напряжение может быть снижено в отдельных точках не только из-за сквозных отверстий или воздушных включений, но и вследствие слабых мест, образовавшихся за счет обугливания органических включений в процессе спекания пленки.

Разработано несколько процессов металлизации пленки, и в настоящее время проводится их внедрение в промышленность. Конденсаторы из металлизированного тефлона разработаны фирмой «Балко рисёрч лэборатори» по заданию воздушных сил. Теоретически объем конденсатора из металлизированного тефлона должен быть в 4 раза меньше объема конденсатора с фольговыми обкладками той же конфигурации и с теми же номинальными значениями емкости и напряжения. Это весьма важно для конденсаторов из тефлона, которые в связи с низкой диэлектрической проницаемостью этого материала обычно имеют небольшую удельную емкость.

Уменьшение объема при металлизации объясняется следующим.

а) Уменьшение числа слоев диэлектрика в 2 раза приводит к изменению объема приблизительно в отношении 2:1. Это становится возможным в результате свойства самовосстановления металлизированной пленки, при котором дефекты диэлектрика изолируются, в связи с чем устра-

няется необходимость удвоения толщины диэлектрика для предотвращения его пробоя.

б) Уменьшение вдвое расстояния между обкладкой и диэлектриком увеличивает емкость в 2 раза. Это соответствует закону обратной пропорциональности между емкостью и толщиной диэлектрика.

Для получения требуемых характеристик конденсаторов из металлизированного тефлона материал обкладок должен удовлетворять следующим требованиям:

1) слой металла должен быть достаточно тонким для того, чтобы обеспечивать его испарение вокруг места пробоя и эффект самовосстановления;

2) металл должен иметь хорошую адгезию к тефлону;

3) толщина слоя металла и его адгезионные свойства не должны уменьшаться при максимальной рабочей температуре 200° C;

4) слой металла не должен ухудшать электрических характеристик пленки тефлона (за счет химического взаимодействия);

5) металл должен иметь высокую электропроводность;

6) металл должен легко испаряться;

7) окислы металла (если этот металл окисляется) не должны влиять на поведение конденсатора.

Исследования «Балко рисёрч лэборатори» показали, что алюминий наиболее полно удовлетворяет этим требованиям. Медь быстро образует окислы, которые могут реагировать с тефлоном при повышении температуры. Серебро хорошо во всех отношениях, за исключением того, что его окись вызывает снижение добротности.

Важно, чтобы в процессе нанесения металла испарением в вакууме тонкая пленка тефлона не растягивалась, так как удлинение пленки более чем на 1% вызывает резкое увеличение электрического сопротивления металлического слоя.

Установлено, что пропитка конденсаторов из металлизированного тефлона кремнийорганическими жидкостями снижает сопротивление изоляции, увеличивает температурный коэффициент емкости, повышает диэлектрическую абсорбцию, но улучшает пробивное напряжение.

Использование для намотки двух металлизированных лент тефлона (обе обкладки металлизированные) вызывает определенные трудности, так как недостаточная жесткость тефлона затрудняет контактирование. В связи с этим разработана комбинированная конструкция, в которой при-

меняют одну металлизированную обкладку из тефлона, вторую — из обычной фольги и один слой неметаллизированного тефлона. На торцы намотанной секции такого типа напыляют металл, используя его для присоединения выводов.

Напряжение тренировки равно двойному номинальному напряжению. Для опытных образцов конденсаторов применяли следующие режимы напряжения в зависимости от толщины металлизированного тефлона:

Толщина металлнзированного тефлона, *мк*	6	9	12,5
Испытательное напряжение, *в*	50—100	200—300	300—400

Для конденсаторов описанного здесь типа температурный коэффициент емкости отрицателен и изменяется в пределах от —72 до —224 · 10 ^{6} *град* ^{1}. Стабильность емкости составляет в среднем от 1 до 2%; в случае негерметизированных образцов изменение несколько больше.

Типовые характеристики двухслойных металлизированных тефлоновых конденсаторов приведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

Типовые характеристики двухслойных металлизированиых тефлоновых конденсаторов

Наименоваиие характеристики	Величина характеристики при температуре			
	25° С	200° С	25° С	200° С
Емкость, *мкф*	0,2562	0,2520*	0,3168	0,3076*
Номннальное напряжение постоянного тока, *в*	—	200	—	800
Коэффициент мощности, %	0,50	0,82	0,2	0,06
Сопротнвление нзоляции, *ом*	$1 \cdot 10^{14}$	—	$4,8 \cdot 10^{13}$	—
Толщина металлизированного слоя, *мк*	6	6	12,5	12,5
Толщина неметаллнзированного слоя, *мк*	6	6	12,5	12,5

* После работы под напряжением в течение 1000 *ч*.

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА (МАЙЛАРА)

Майлар — полиэфирный материал, известный в Англии под названием мелинекс, — является превосходным диэлектриком, имеющим преимущество перед бумагой в отношении более высокого сопротивления изоляции и несколько более высокой рабочей температуры (около 150° С).

Майлар можно использовать как самостоятельно, так и в сочетании с бумагой или другими пленками. В тех случаях, когда в качестве конденсаторного диэлектрика применяют майлар без какой-либо дополнительной прокладки, пленку обычно пропитывают полистиролом, минеральным маслом, кремнийорганической или какой-либо другой жидкостью с целью заполнения сквозных отверстий. Пленки майлара изготовляют различной толщины. Для электротехники выпускают пленки толщиной 6, 12,5 и 25 *мк*.

Пленку можно как серебрить, так и металлизировать в вакууме алюминием или цинком. Электрическая прочность пленки зависит от ее толщины. Была проведена значительная работа для того, чтобы определить, например, будет ли электрическая прочность конденсаторов выше, если при намотке один слой пленки толщиной 12 *мк* заменить двумя слоями пленки толщиной по 6 *мк*. Полученные результаты нельзя считать окончательными. Пленки обычно используемых толщин имеют хорошую электрическую прочность, но все же наилучшую электрическую прочность получают на пленках толщиной 25 *мк*. Пленка такой толщины выдерживает кратковременное воздействие электрического поля напряженностью 160 *кв/мм*. С целью полного использования электрической прочности необходимо предотвращать появление короны на переменном токе, вызывающей старение диэлектрика. Было найдено, что пленка разрушается на воздухе от воздействия короны при эффективном значении напряжения 300—400 *в*. Поэтому майларовые конденсаторы высокого напряжения для предотвращения возникновения короны должны быть надежно герметизированы и тщательно пропитаны.

Необходимо отметить, что полиэтилентерефталат чувствителен к воздействию температуры и частоты. При низких частотах его диэлектрическая проницаемость почти такая же, как у бумаги, но при высокой частоте снижается до того значения, которое получается для полистирола. При изменении частоты в широком интервале потери имеют максимум; при комнатной температуре он находится при частоте около 1 *Мгц*.

Изменение коэффициента мощности и диэлектрической проницаемости с частотой показано на рис. 9-5 и 9-6.

Как уже отмечалось выше, одним из важнейших свойств майлара является его исключительно высокое по сравнению

с бумагой сопротивление изоляции при высоких температурах. Это видно из кривых рис. 9-7.

Другое важное преимущество майлара перед крафт-бумагой — очень низкая гигроскопичность при нормальной комнатной температуре (меньше 0,5% при испытании погружением в воду). При тех же самых условиях крафт-

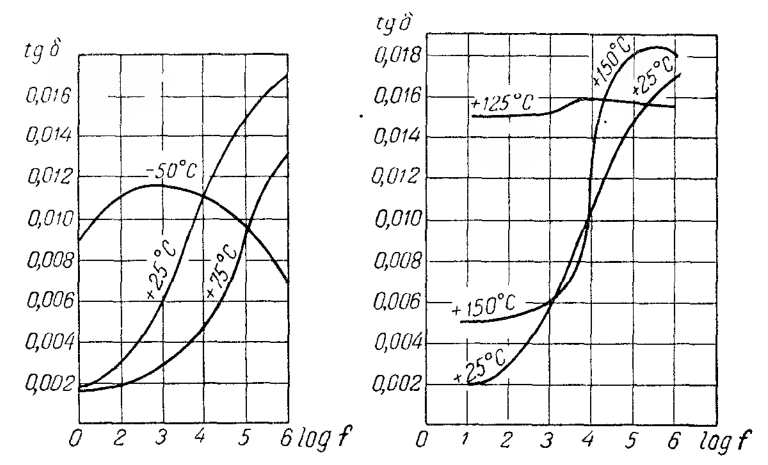


Рис. 9-5. Зависимость угла потерь пленки майлар фирмы «Дюпон де Немур» от частоты при различных температурах (по оси абсцисс отложен логарифм частоты в герцах; цифры у кривых — значения температуры в градусах Цельсия).

бумага абсорбирует до 6% влаги по весу. Остаточная влага в бумажных фольговых конденсаторах — основная причина преждевременного выхода конденсаторов из строя. Даже после тщательной вакуумной сушки в бумаге может оставаться более 0,1% абсорбированной влаги по весу.

Изменение емкости типового майларового конденсатора в интервале температур от —60 до +160° С показано на рис. 9-8, а изменение коэффициента мощности с температурой и частотой иллюстрируется рис. 9-9.

ОБЛУЧЕННЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН

Облучением бэта- и гамма-лучами можно повысить верхний предел рабочей температуры полиэтилена без значительного ухудшения электрических свойств. Полиэтилен имеет очень низкие потери при всех радиочастотах и низкую

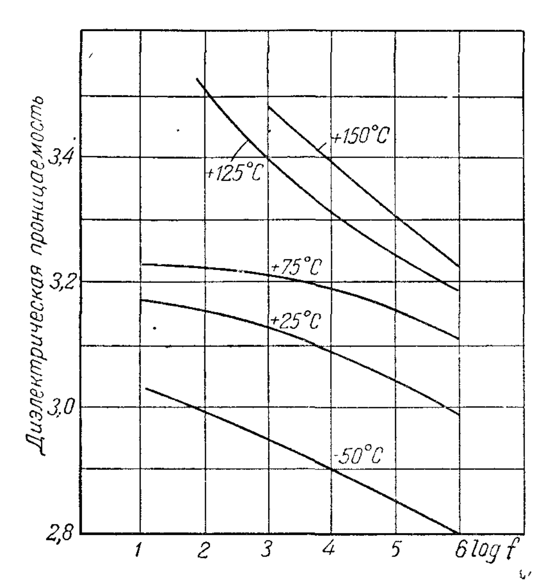


Рис. 9-6. Зависимость диэлектрической проницаемости пленки майлар от температуры (обозначения те же, что и на рис. 9-5).

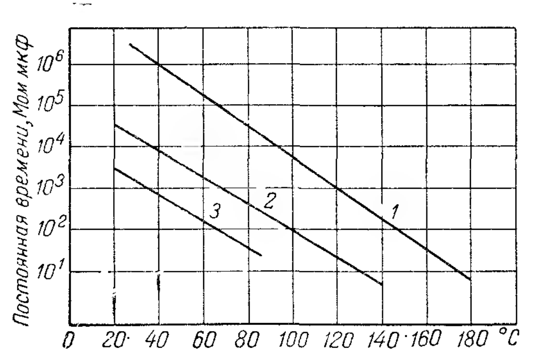


Рис. 9-7. Зависимость постоянной времени от температуры для бумажных и майларовых конденсаторов.

1 — майлар; 2 — бумага, пропитанная полимеризующейся смолой; 3 — бумага, пропитанная воскообразным компаундом.

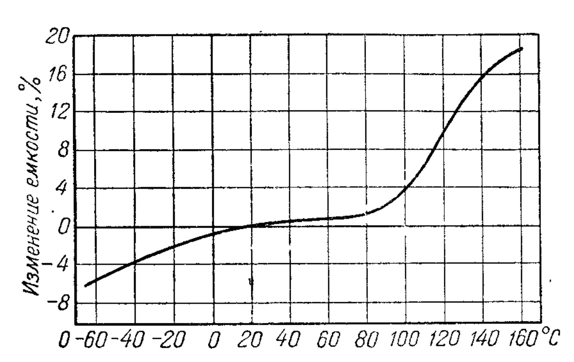


Рис. 9-8. Температурная зависимость емкости для типичного майларового конденсатора.

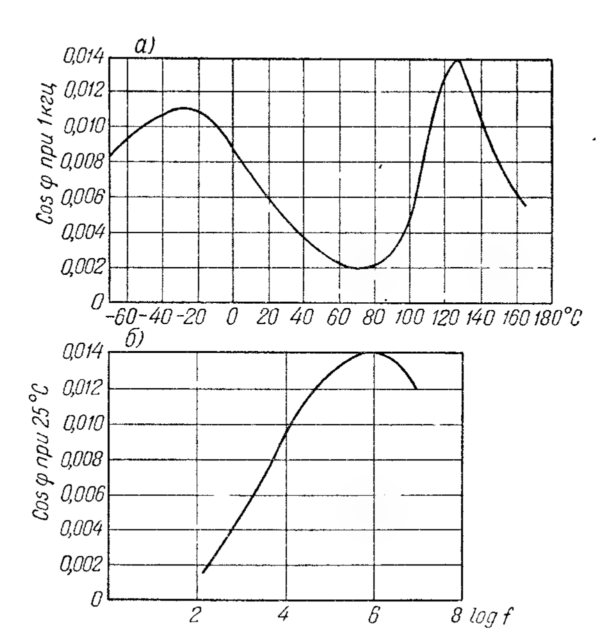


Рис. 9-9. Зависимость коэффициента мощности типичного майларового конденсатора: *а* — от температуры; *б* — от частоты.

диэлектрическую проницаемость, но размягчается уже при 70° С, что зависит до некоторой степени от его состава, и плавится при температуре около 120° С. Он разрушается и набухает во многих органических растворителях и углеводородных маслах. Когда полимер подвергается воздействию гамма-лучей, все эти свойства изменяются в зависимости от дозы облучения. Слабая доза несколько повышает нагревостойкость за счет образования поперечных связей между полимерными молекулами, но увеличение дозы делает материал в большей степени аморфным, чем кристаллическим, в результате чего он не плавится и не размягчается до температуры порядка 200° С. В то же самое время электрические свойства полиэтилена несколько ухудшаются, и он изменяет цвет от белого до желтого. В таком состоянии полиэтилен уже не разрушается растворителями и маслами. Можно предположить, что подобное изменение свойств происходит в результате того, что молекулярные цепи полимера приобретают поперечные связи в большей или меньшей степени в зависимости от дозы облучения, водород освобождается и происходит частичное окисление.

Начаты опыты по внедрению этого материала в конденсаторостроение, причем встречены трудности при окончательном оформлении конденсатора, так как невозможно при существующей технологии облучения заготовить по приемлемой цене необходимое количество пленки для намотки конденсаторов. Собранный конденсатор нельзя облучить, так как алюминиевая фольга будет поглощать в известной степени энергию излучения. Дополнительные исследования полиэтилена могут привести к улучшению его свойств.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Почти 70 лет прошло с тех пор, как в Германии был изготовлен первый электролитический конденсатор; принцип работы этого конденсатора был обнаружен еще раньше — около 90 лет тому назад. Большая удельная емкость, рассчитанная на единицу объема, является выдающимся преимуществом электролитического конденсатора.

КОНДЕНСАТОРЫ С АНОДАМИ ИЗ ГЛАДКОЙ ФОЛЬГИ

Большая величина емкости обусловлена применением очень тонкого слоя диэлектрика, толщиной порядка 10^{-5} *см*. Столь тонкая пленка получается методом анодного окисления. В процессе электролитической «формовки» определенные металлы, такие, как алюминий, тантал, ванадий, магний, висмут и сурьма, легко покрываются пленкой диэлектрика. Если алюминиевый электрод поместить в раствор борнокислого аммония и приложить к нему постоянное напряжение, первоначальный ток формовки будет большим, но по мере образования окисной пленки ток постепенно спадает, как показано на рис. 10-1.

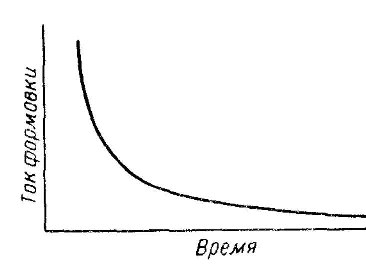


Рис. 10-1. Зависимость тока формовки от времени при постоянном напряжении формовки.

Процесс формовки заключается в создании на поверхности пластины тонкой пленки алюминия. В современной практике анодная фольга поступает в бак с электролитом, где на нее подается напряжение постоянного тока. Длительность и напряжение формовки зависят от требуемой толщины слоя окиси металла.

Пленка имеет исключительно высокую электрическую прочность. Напряжение 100 *в*, приложенное к пленке толщиной 10^{-5} *см*, создает в ней напряженность поля, равную 10^{7} *в/см*. Эта величина приближается к пределу теоретической прочности, предсказываемой ионной теорией кристаллов. Ни в каком другом случае такое значение практически еще не достигалось. Максимальная емкость, получаемая при данной площади анода, обратно пропорциональна величине формовочного напряжения, т. е. толщина пленки зависит от напряжения формовки. В низковольтных конденсаторах оксидный слой тоньше, поэтому они имеют бóльшую удельную емкость, чем высоковольтные конденсаторы.

Величина рабочего напряжения составляет около 90% величины формовочного напряжения, а наибольшую толщину пленки можно получить формовкой при 600 *в*, поэтому напряжение порядка 500—550 *в* (при комнатной

температуре) следует рассматривать как максимально возможное рабочее значение. В эту величину надо включать амплитуду переменной составляющей, когда конденсатор используется в фильтрах приемников, для сглаживания пульсирующего напряжения. Легко заметить, что для данного типа конденсаторов величина допустимых перенапряжений ограничена; если на конденсатор воздействуют напряжения, превышающие допустимое пиковое значение, то возникает искрение. Искровое напряжение характеризует начало пробоя конденсатора, при котором диэлектрик частично разрушается, что приводит к появлению газообразных продуктов, локальному перегреву и частичному разложению разделительной прокладки и электролита.

Составными частями электролитического конденсатора являются:

1) алюминиевая фольга — обкладка с положительным потенциалом или анод;

2) пленка окиси — диэлектрик;

3) электролит (обычно водный раствор борнокислого аммония, борной кислоты и гликоля) — обкладка с отрицательным потенциалом, или «истинный» катод;

4) разделительные прокладки (обычно крафт-бумага), необходимые для предотвращения непосредственного контакта «катодной» фольги с анодной пленкой;

5) вторая алюминиевая фольга, создающая контакт с электролитом и называемая обычно «катодом».

Изготовление сухого электролитического конденсатора с гладкой фольгой начинается с нанесения окиси алюминия на обе стороны алюминиевой фольги, имеющей толщину от 50 до 125 *мк*. Используются две ленты алюминиевой фольги (анодная формованная фольга и простая фольга, служащая контактирующим электродом для электролита — катода), разделенные двумя слоями пористой бумаги толщиной 50—75 *мк*, пропитанной электролитом.

Электролит должен быть в непосредственном контакте с диэлектриком. Кроме выполнения функций истинного катода при работе электролитического конденсатора, электролит обеспечивает также механизм самовосстановления путем переформовки слоя диэлектрика, если произойдет незначительный пробой этого слоя. Ленты фольги и бумаги наматывают в виде спиральной секции, которую затем

помещают в алюминиевый корпус, как показано на рис. 10-2.

Возможность появления коррозии в результате влияния тепла и влаги устраняют качественной герметизацией кор-

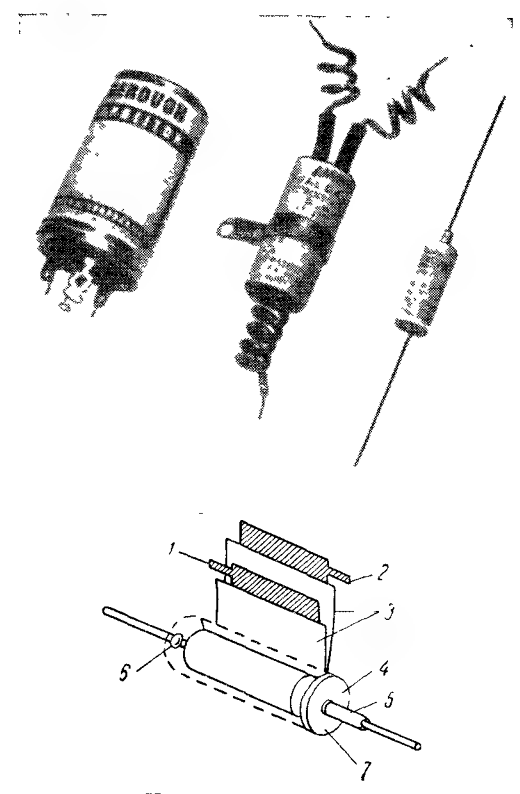


Рис. 10-2. Конструкция сухого электролитического конденсатора.

1 — анод (оксидированный алюминий); *2* — катод (неоксидированный алюминий); *3* — бумажная прокладка, пропитанная электролитом; *4* — гетинаксовый диск, облицованный резиной; *5* — анодный вывод; *6* — соединение катодного вывода с корпусом; *7* — корпус.

пуса и использованием алюминия для всех металлических частей. Герметизацией корпуса предотвращают также высыхание электролита, которое может сократить срок службы конденсатора.

За последние несколько лет проведена работа по увеличению активной площади анодов, по изысканию новых материалов для анодов и новых электролитов. Было установлено также, что повышение чистоты алюминиевой фольги должно уменьшать ток утечки и удлинять срок службы алюминиевых электролитических конденсаторов. Использование алюминия для электролитических конденсаторов ограничивается двумя важными обстоятельствами: наличием примесей меди и железа в алюминии и растворимостью окиси алюминия в растворах кислот. Первое обстоятельство, по-видимому, сильно влияет на срок хранения конденсатора. Примеси, контактируя с электролитом, создают гальваническую э. д. с., вызывающую протекание тока; это приводит к коррозии электродов и в конечном итоге уменьшает срок безопасного хранения конденсатора. Когда конденсатор работает под напряжением, наличие примесей на поверхности фольги тоже опасно, так как способствует возрастанию тока утечки и появлению местных перегревов.

В течение ряда лет алюминиевые электролитические конденсаторы изготовлялись из фольги с содержанием алюминия 99,87%. Появление фольги с содержанием алюминия 99,99% позволило изготовлять алюминиевые электролитические конденсаторы с током утечки, сниженным в 10 раз, и со сроком хранения, увеличенным на несколько лет.

Если заформовать обе алюминиевые обкладки и осуществить от них изолированные выводы, то получится неполярный электролитический конденсатор. Каждый из слоев диэлектрика в таком конденсаторе попеременно находится под полным рабочим напряжением. Так как этот процесс удваивает толщину диэлектрика (суммируются толщины двух оксидных пленок), то у неполярных образцов при том же номинальном напряжении, что и у полярных, емкость вдвое меньше (при равной площади фольги).

Корпус неполярных конденсаторов должен быть изготовлен с клапаном для выхода газов, так как в конденсаторах этого типа газовыделение может быть иногда значительным и при отсутствии предохранительного клапана может привести к взрыву герметизированного корпуса. Конструкция клапана не должна допускать проникновения загрязнений внутрь конденсатора, а также испарения электролита.

Электрические характеристики

Основными электрическими характеристиками являются:

1) емкость и ее зависимость от температуры и частоты;

2) коэффициент мощности и его зависимость от температуры и частоты;

3) ток утечки и его зависимость от времени, температуры и напряжения.

На рис. 10-3 показано изменение емкости типичного конденсатора в зависимости от температуры и частоты. Из рас-

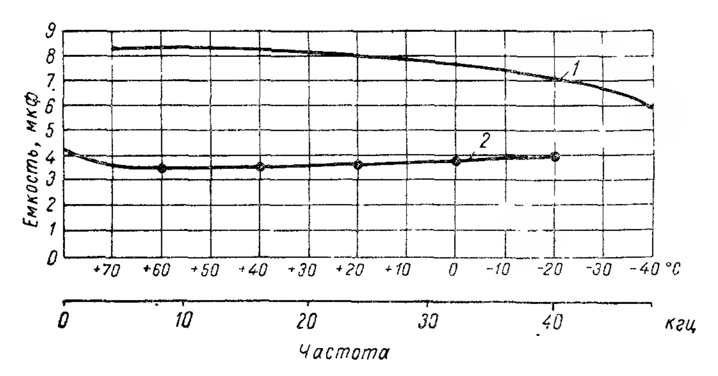


Рис. 10-3. Зависимость емкости сухого электролитического конденсатора от температуры (*1*) и от частоты (*2*).

Кривая *1* получена для номинальной емкости 8 *мкф*, а кривая *2* — для 4 *мкф*.

смотрения верхней кривой видно, что при низких температурах электролитические конденсаторы в значительной степени теряют свою емкость. Это происходит вследствие замерзания электролита, что увеличивает последовательное сопротивление.

Нижняя кривая показывает изменение емкости с частотой. От нуля до 10 *кгц* емкость уменьшается незначительно; эквивалентное последовательное сопротивление после быстрого снижения при частотах до 500 *гц* медленно уменьшается вплоть до частоты 10 *кгц*. Коэффициент мощности увеличивается от небольшого значения до 50% в том же самом интервале частот. При частотах выше 10 *кгц* емкость несколько увеличивается, но не более чем на 10% при 50 *кгц*.

Электролитические конденсаторы можно использовать в этой области частот в качестве фильтровых конденсаторов

для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. При комнатной температуре и радиочастотах они обладают низким сопротивлением, порядка 1 *ом*. Поэтому их можно использовать в настроенных контурах только при условии, что потери такого порядка допустимы.

На рис. 10-4 показано изменение величины коэффициента мощности в зависимости от температуры и частоты. Высокий коэффициент мощности электролитического конденсатора определяется сопротивлением электролита; эквивалентное

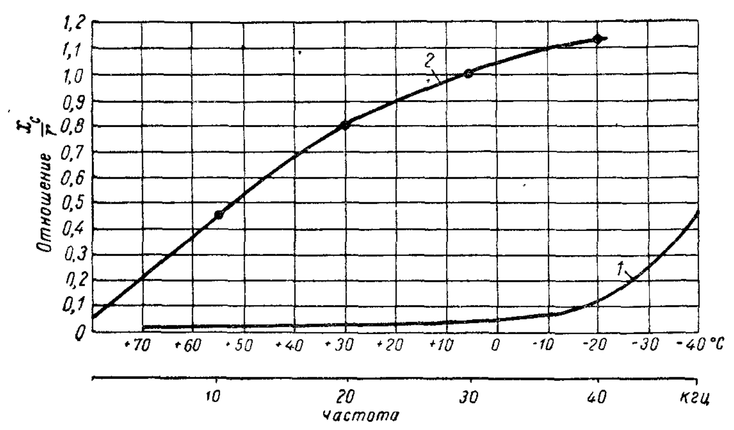


Рис. 10-4. Зависимость отношения реактивного сопротивления к активному (величины cos φ) для электролитического сухого конденсатора от температуры и частоты; обозначения те же, что и на рис. 10-3.

последовательное сопротивление электролитического конденсатора ненамного больше, чем сопротивление электролита. Такой высокий коэффициент мощности неизбежен; попытки уменьшить сопротивление электролита применением более тонкой прокладочной бумаги приводят к повышению тока утечки, снижению пробивного напряжения и уменьшению срока службы. С другой стороны, коэффициент мощности не должен быть больше определенной величины (даже если при нормальной температуре допустимы более высокие его значения), так как иначе его величина, соответствующая низким температурам, чрезмерно увеличится.

Возрастание коэффициента мощности в 10 раз при температуре —30° С по сравнению с его величиной при +25° С вполне нормально. Практически выгодно, что коэффициент

мощности возрастает в области низких температур, так как наиболее опасным следствием высокого значения этой характеристики является тепловыделение внутри конденсатора; снижение коэффициента мощности с ростом температуры исключает опасность прогрессирующего саморазогрева. Если бы коэффициент мощности возрастал с температурой и притом быстрее, чем растет скорость охлаждения, то создались бы условия для тепловой нестабильности, и конденсатор в конечном счете взорвался бы.

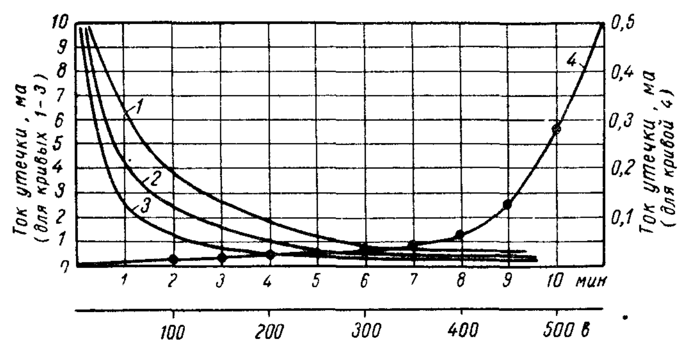


Рис. 10-5. Зависимость тока утечки электролитического конденсатора от времени (кривые *1*—*3*) и от напряжения (кривая *4*); кривые *1*—*3* получены прн напряжении 425 *в* и разном значении временн хранения:

1 — срок хранения 12 мес.; *2* — срок хранения 6 мес.; *3* — срок хранения 3 мес. Кривая *4*, по-видимому, получеча для свежеизготовленного конденсатора. По оси абсцисс отложены значения времени в минутах и величины напряжения в вольтах.

Так как коэффициент мощности приблизительно равен $\frac{R}{Z} \approx R\omega C$, то уменьшение емкости при низкой температуре создает тенденцию к снижению коэффициента мощности. Поэтому эквивалентное последовательное сопротивление R при низких температурах должно увеличиваться быстрее, чем коэффициент мощности. Таким образом, если емкость уменьшается вдвое, а величина коэффициента мощности увеличивается в 10 раз по сравнению с первоначальным значением, то эквивалентное последовательное сопротивление должно увеличиться в 20 раз; для типичного конденсатора емкостью 1 *мкф* при температуре 25° С оно составляет около 100 *ом*.

Величина допустимого рабочего напряжения конденсатора определяется зависимостью тока утечки от приложен-

ного напряжения (рис. 10-5). В данном примере допустимое рабочее напряжение ограничивается величиной 400—450 *в*. Выше этого напряжения ток утечки быстро возрастает, и вскоре наступает пробой.

Ток утечки возрастает также с повышением температуры и достигает очень большой величины при приближении пробоя. Кривые зависимости тока утечки от температуры по форме подобны кривым зависимости тока утечки от напряжения.

За время хранения без воздействия напряжения происходит процесс «расформовки»: кривые зависимости тока утечки от напряжения перемещаются в направлении, указанном стрелкой, при работе под напряжением получается обратная картина. Выход конденсаторов из строя после длительного периода хранения и объясняется в основном перемещением вверх кривой зависимости тока утечки от времени (с одновременным аналогичным изменением характера зависимости тока утечки от напряжения).

К основным недостаткам электролитических конденсаторов можно отнести высокий коэффициент мощности (в 10 раз больше, чем у бумажных конденсаторов), значительные колебания емкости (возможны отклонения емкости от —20 до +150% номинальной величины), малый коэффициент запаса по напряжению и высокий ток утечки.

Основными преимуществами электролитических конденсаторов являются, конечно, их очень высокая удельная емкость, отнесенная к единице объема, и их относительно низкая стоимость. При использовании конденсаторов в качестве фильтровых, а также для развязки и шунтирования эти достоинства могут перевесить все перечисленные выше недостатки.

В случае применения полярных электролитических конденсаторов необходимо соблюдать следующие общие условия:

1. Приложенное пиковое напряжение должно быть меньше номинального напряжения. Когда на постоянное напряжение накладывается переменная составляющая, пиковое значение напряжения равно сумме постоянного напряжения и амплитуды переменной составляющей. Величина амплитуды переменной составляющей обычно не должна превышать 10% величины постоянного напряжения.

2. Полярность приложенного напряжения не должна изменяться. Постоянное напряжение всегда следует пода-

вать с соблюдением определенной полярности, но небольшое по величине переменное напряжение может быть подано на несколько минут без наложения поляризующего постоянного напряжения. Так удобно поступать при измерении полного сопротивления электролитического конденсатора.

3. Переменная составляющая тока не должна вызывать опасного перегрева. Для каждого размера конденсатора обычно указывают допустимое максимальное значение этой переменной составляющей.

КОНДЕНСАТОРЫ С АНОДАМИ ИЗ ТРАВЛЕНОЙ ФОЛЬГИ

Конденсатор с анодом из травленой фольги меньше по размеру, чем конденсатор с гладкой фольгой, так как используемая в нем анодная фольга проходит перед формовкой операцию травления в кислоте, что увеличивает активную поверхность анода. Так как электролит — это раствор или паста, то он способен контактировать со всей тонкой оксидной пленкой, созданной на такой шероховатой поверхности. Необходимо очень тщательно контролировать процесс травления для того, чтобы вся поверхность фольги была протравлена равномерно, без пропусков, а также чтобы на поверхности не оставалось следов кислотных загрязнений. Увеличение поверхности анода приводит к значительному увеличению емкости, получаемой при заданной площади анода. При травлении в соляной кислоте эффективная поверхность анода может быть увеличена в 6 раз. Внешние размеры конденсаторов с травлеными анодами можно уменьшить в соответствии с этим увеличением поверхности анода. Хотя конденсаторы с травлеными анодами намного меньше конденсаторов с гладкими анодами при заданном номинальном напряжении, однако они менее стабильны. Как видно из рис. 10-6, величина коэффициента мощности возрастает в 2—4 раза. Этот рисунок иллюстрирует изменение коэффициента мощности в зависимости от номинального напряжения при температуре 25° С и частоте 120 *гц* для сухих электролитических конденсаторов с гладкими и травлеными анодами.

При температуре —40° С и частоте 120 *гц* полное сопротивление обычно в 5—7 раз больше, чем при 25° С, а величина емкости составляет от 25 до 75% того значения, которое получается при 25° С. Поскольку могут применяться различные электролиты, количественное изменение выше-

указанных параметров будет зависеть от номинального напряжения и величины емкости. Чтобы предотвратить искрение в электролите, при изготовлении конденсаторов с более высоким номинальным напряжением используют более высокоомные электролиты.

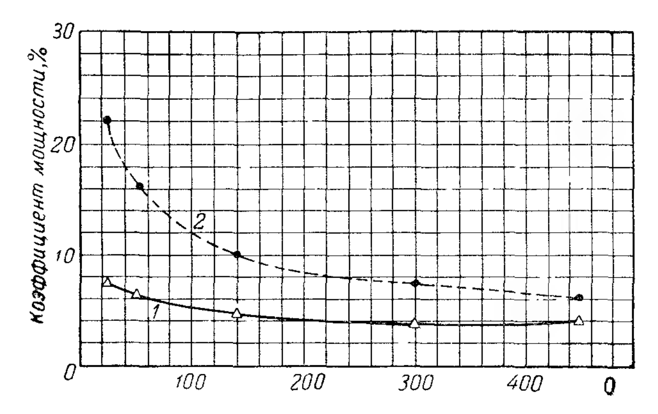


Рис. 10-6. Зависимость коэффициента мощности от номинального напряжения для электролитических конденсаторов с гладкой (*1*) и травленой (*2*) анодной фольгой.

Конструкция двухсекционных конденсаторов с различными номинальными напряжениями не является оптимальной, так как обе секции пропитаны одним и тем же электролитом. В этом случае обычно используют электролит, предназначенный для высоковольтных секций; таким образом, низковольтные секции будут иметь более высокие последовательное сопротивление и коэффициент мощности, чем эквивалентные им односекционные конденсаторы.

КОНДЕНСАТОРЫ С АНОДАМИ ИЗ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ФОЛЬГИ ИЛИ ТКАНИ

Большое увеличение удельной поверхности можно получить, применяя алюминиевую фольгу, на которую методом шоопирования напылен слой чистого алюминия. Эффективная площадь анода получается при этом еще больше, чем при травлении, и емкость образца может быть в 10 раз больше, чем с электродами из гладкой фольги того же размера. На рис. 10-7 сравниваются характеристики конден-

саторов с шоопированными анодами и с анодами из гладкой фольги. Аналогичный результат можно получить, используя тонкую ткань, шоопированную алюминием. Конденса-

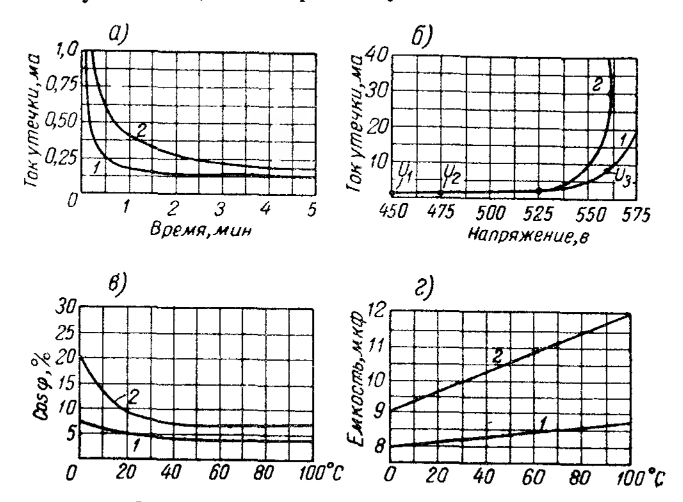


Рис. 10-7. Сравнение характернстнк электролитических конденсаторов с гладкими анодамн нз фольги (*1*) н с анодами нз металлизированной ткани (*2*), изготовленных фирмой «Плесси» (номинальные данные: 8 *мкф* и 400 *в*): *а* — зависимость тока утечки от времени; *б* — зависимость тока утечки от напряжения: U_1 — рабочее напряжение; U_2 — пиковое напряжение; U_3 — искровое напряженне; *в* — завиcнмость коэффициента мощности при частоте 50 *гц* от температуры; *г* — зависимость емкостн от температуры.

торы этого типа имеют увеличенный ток утечки, большее изменение емкости и высокое полное сопротивление при низкой температуре, поэтому они непригодны для использования в военном оборудовании.

ТАНТАЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В настоящее время в танталовых конденсаторах используют три основных типа танталовых анодов: прессованные таблетки, гладкую и травленую фольгу, гладкую и травленую проволоку. Применяя такие аноды, а также различные виды пропиток и технологии изготовления, можно получать конденсаторы с совершенно различными характеристиками.

Конденсаторы с объемно-пористыми анодами

Аноды для танталовых конденсаторов этого типа изготовляют спеканием пористой таблетки из прессованного танталового порошка в высоком вакууме при температуре, приблизительно равной 2100° С. Затем таблетку помещают в формовочную ванну, где на поверхности анода образуется слой окиси. После этого монтируют ее в серебряный корпус с серной кислотой или с хлористым литием в качестве электролита. Таким образом, эти конденсаторы по существу являются «мокрыми» (жидкостными) электролитическими конденсаторами. Так как в данном случае должен быть выбран электролит с высокой электропроводностью, то использование танталовых анодных таблеток с серебряным корпусом-катодом ограничивается областью низких напряжений. Такой тип электролита используется для снижения внутреннего сопротивления конденсаторов, так как расстояние между анодом и катодом в них больше, чем в танталовых конденсаторах фольгового типа.

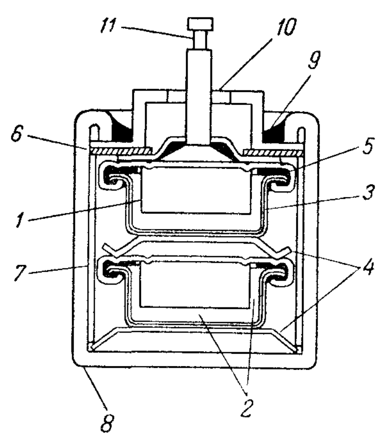


Рис. 10-8. Конструкция герметизированного танталового объемно-пористого электролитического конденсатора из двух ячеек.

1 — спеченный анод; *2* — электролит; *3* — серебряный корпус; *4* — пружины; *5* — тефлоновая шайба; *6* — изоляционная прокладка; *7* — разделитель; *8* — внешний корпус (отрицательный вывод); *9* — место пайки крышки к корпусу; *10* — стеклянный проходной изолятор; *11* — положительный вывод.

Изготовляют два основных типа танталовых конденсаторов.

Один из них герметизированный. Герметизация осуществляется методом завальцовки края корпуса-катода и дискового вывода от спеченного анода с применением уплотняющего кольца из политетрафторэтилена, которое служит как для герметизации, так и для изоляции катода от анода. Рабочим электролитом в этих конденсаторах служит раствор серной кислоты. Затем сборку герметизируют в стальном корпусе, как показано на рис. 10-8, где детально изображена

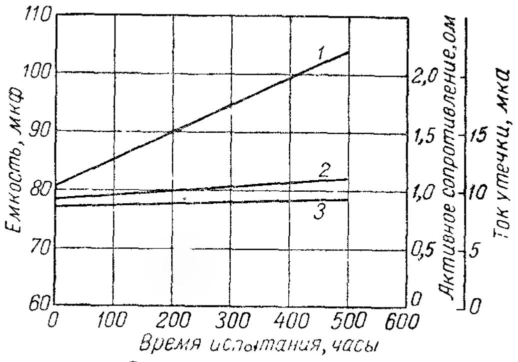


Рис. 10-9. Средние результаты испытання для семи конденсаторов фирмы «Мэллори» (номинальные данные: 80 *мкф*, 60 *в*) при длительной работе их в условиях воздействия напряжения 32 *в* (постоянный ток) и температуры 225° С.

1 — емкость; 2 — эквивалентное последовательиое активное сопротивление; 3 — ток утечки.

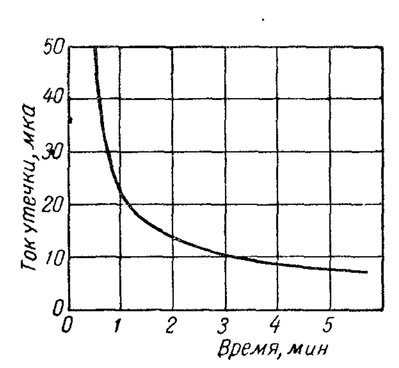


Рис. 10-10. Зависимость тока утечки танталового конденсатора фирмы «Мэллори» от времени приложения напряжения 90 *в* после предварительной зарядки 5 *мин*; номинальные данные: 25 *мкф*, 90 *в*; тип XTL-25. Кривая получена после хранения в течение 5 лет при комнатной температуре без напряжения. За время хранения емкость увеличилась с 24,6 до 26,1 *мкф*, последовательное сопротивление уменьшилось с 1,63 до 1,07 *ом*.

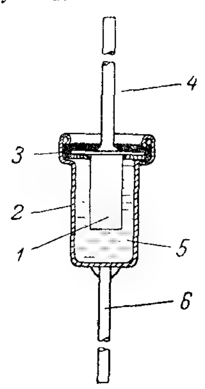


Рис. 10-11. Конструкция миниатюрного танталового объемно-пористого электролитического конденсатора.

1 — спеченный анод; 2 — серебряный корпус; 3 — изоляция и уплотнение; 4 — анодный вывод; 5 — электролит; 6 — катодный вывод.

конструкция двухсекционного конденсатора рассматриваемого типа.

Номинальное напряжение этого конденсатора емкостью 25 *мкф* составляет 180 *в*. Конденсаторы на другое номинальное напряжение конструируют подобным же образом, выбирая необходимое число секций. Конденсаторы на рабочее напряжение 90 *в* и ниже односекционные, при более высоких номинальных напряжениях применяют последовательное соединение секций. Так, например, конденсатор на рабочее напряжение 630 *в* собран из семи секций.

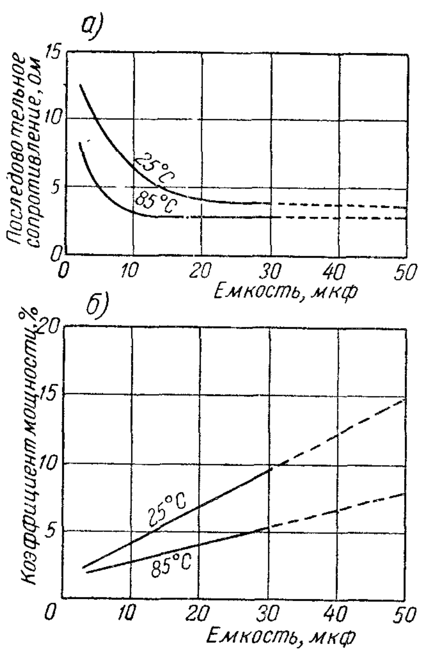


Рис. 10-12. Зависимость эквивалентного последовательного сопротивления (*а*) и коэффициента мощности (*б*) от номинальной емкости для конденсаторов объемно-пористого типа с номинальным напряжением от 6 до 100 *в* при двух значениях температуры.

Эти конденсаторы способны работать в интервале температур от —55 до +175° С, верхний предел может быть даже повышен до +200° С, если будет использовано специальное покрытие для защиты паяных швов, обеспечивающих герметизацию корпуса. Допуск по емкости составляет от —15 до +75%, а пределы номинальных емкостей конденсаторов — от 7 до 240 *мкф* при соответствующем изменении номинального напряжения от 630 до 18 *в* постоянного напряжения при температуре окружающей среды 85° С. Различают несколько типов конденсаторов в зависимости от конструкции выводов и методов монтажа.

На рис. 10-9 приведены кривые изменения тока утечки, эквивалентного сопротивления и емкости типичных образцов в зависимости от времени испытания при температуре 225° С. На рис. 10-10 показано изменение тока утечки во

времени после длительного хранения конденсатора при комнатной температуре без напряжения.

Второй тип конструкции танталовых электролитических конденсаторов со спеченными анодами герметизируют с помощью неопреновой резины в серебряных корпусах. Серебряный корпус завальцовывают на резиновую прокладку, помещенную поверх дискового вывода прессованной таблетки. Конструкция этих миниатюрных конденсаторов показана на рис. 10-11.

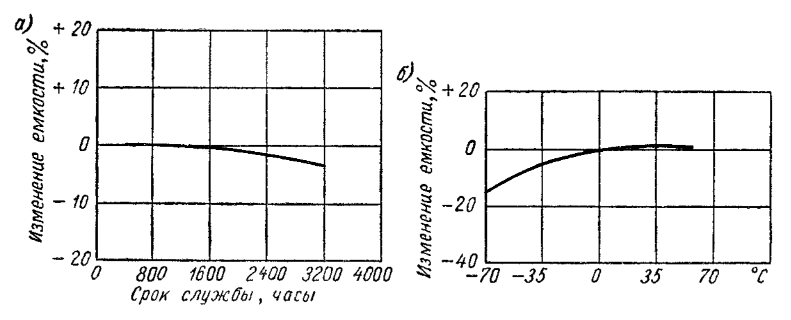


Рис. 10-13. Зависимость емкости конденсатора (4 *мкф*, 60 *в*) от срока службы (*а*) и от температуры (*б*).

Конденсаторы имеют следующие характеристики:

Интервал температур	От —55 до 85° С
Номинальное напряжение при 85° С (постоянный ток)	От 6 до 125 *в*
Диапазон емкостей	От 1,7 до 60 *мкф*
Допуск по емкости	От —15 до + 30%

На рис. 10-12 показано изменение коэффициента мощности и эквивалентного последовательного сопротивления при увеличении номинальной емкости типичных конденсаторов данной конструкции. Кривые изменения емкости в зависимости от температуры и от срока службы для конденсатора емкостью 4 *мкф* с рабочим напряжением 60 *в* приведены на рис. 10-13.

Недавно разработан новый вариант конструкции, приведенной на рис. 10-11, отличающийся тем, что диаметр конденсатора не изменяется по всей длине его корпуса. Другие характеристики конденсатора в основном остаются без изменения.

Конденсаторы твердого типа

Новинкой современного производства в области танталовых конденсаторов являются малогабаритные низковольтные конденсаторы с «твердым электролитом». В них вместо водного раствора электролита используют твердый полупроводник. «Твердый электролит» обычно вводят в поры предварительно заформованного объемно-пористого анода в виде раствора азотнокислого или сернокислого марганца, который при нагревании превращается затем в двуокись марганца. Пленку диэлектрика необходимо отформовать повторно, помещая аноды в формовочную ванну для того, чтобы «залечить» повреждения в оксидной пленке, вызванные воздействием горячих активных окислов азота, образующихся в процессе создания слоя MnO_2. Вследствие искрения получить при этом первоначальное формовочное напряжение невозможно. Именно опасность искрения заставляет ограничивать величину номинального рабочего напряжения приблизительно одной третью первоначального значения формовочного напряжения.

Использование полупроводника вместо жидкого электролита значительно изменяет характеристики конденсатора. Отсутствие водного раствора снимает проблему электролиза и связанного с ним давления газов внутри конденсатора. При использовании жидкой системы необходима герметизация, допускающая выход газа при повышении давления для того, чтобы предотвратить взрыв при чрезмерном повышении давления внутри корпуса. Так как уплотнение корпуса при этом не полностью герметично, то часть электролита испаряется; величина потерь на испарение определяет срок службы конденсатора. Также и максимальная рабочая температура конденсатора этого типа ограничивается давлением паров жидкой системы. Поэтому «твердый электролит» в принципе должен обеспечить более длительный срок службы и более высокую рабочую температуру конденсатора.

В дополнение к этим преимуществам и электрические характеристики конденсаторов данного типа значительно улучшены. Мак-Лин и Пауэр (см. библиографию, раздел 10) установили линейное изменение емкости с температурой для таких конденсаторов при температурном коэффициенте емкости, равном $707 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, и малый коэффициент мощности в области низких температур. Улучшение харак-

теристик обусловлено высокой электропроводностью MnO_2 в широком интервале температур от —80 до +100° С. Электропроводность проводящих растворов падает при возрастании вязкости и достигает острого максимума при замерзании раствора. Конденсатор с «твердым электролитом» обладает улучшенной частотной зависимостью емкости, что может быть объяснено разделением зарядов в слое Ta_2O_5, обусловленным электронной проводимостью полу-

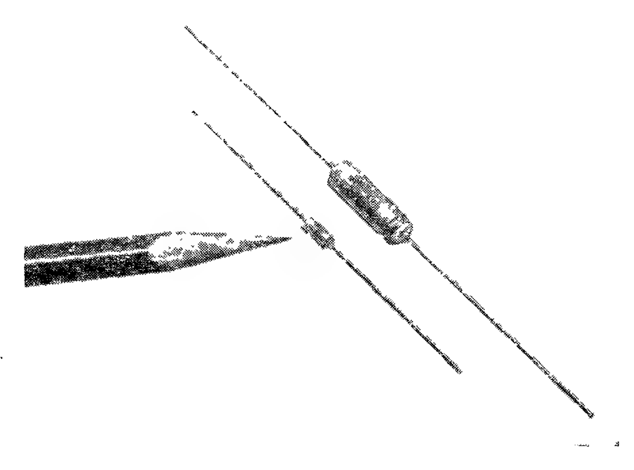


Рис. 10-14. Сопоставление размеров оксидно-полупроводникового танталового конденсатора (4,7 *мкф*, 10 *в*) и миниатюрного алюминиевого электролитического конденсатора с близкими номинальными характеристиками (справа), по данным фирмы «Спрейг».

проводника (см. Fraioli, A. V., библиография, раздел 10).

Характеристики конденсаторов этого типа, за исключением величины их удельной емкости, сравнимы с характеристиками бумажного конденсатора в большей степени, чем с характеристиками электролитического конденсатора с жидким электролитом. Для получения малых величин емкости (обычно до 0,1 *мкф*) аноды изготовляют из гладкой танталовой проволоки. Травленую проволоку или объемно-пористые аноды применяют для получения больших емкостей. На рис. 10-14 сравниваются размеры двух конденсаторов с одинаковыми номинальными данными: алюминие-

вого электролитического и объемно-пористого танталового с «твердым электролитом».

В связи с увеличенным сроком службы, расширенным интервалом рабочих температур и превосходными электрическими характеристиками эти конденсаторы широко применяют в транзисторной технике. В настоящее время максимальное рабочее напряжение конденсаторов составляет 50 *в* постоянного тока в диапазоне температур от —55 до

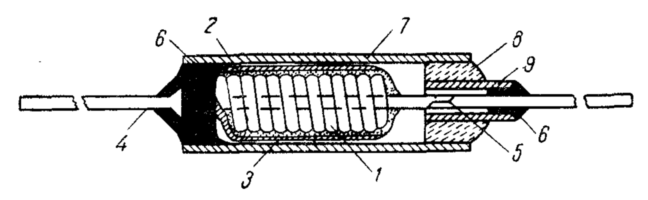


Рис. 10-15. Конструкция проволочного танталового конденсатора с «твердым электролитом» (оксидно-полупроводникового).

1 — проволочный анод; *2* — полупроводник (двуокись марганца); *3* — медь; *4* — выводной проводник; *5* — сварка; *6* — пайка; *7* — металлический корпус; *8* — стеклянный изолятор; *9* — металлическая втулка изолятора.

+85° С, хотя проводится значительная работа по повышению рабочего напряжения и расширению интервала температур (см. Fraioli, A. V., библиография, раздел 10). Детали конструкции конденсатора рассматриваемого типа показаны на рис. 10-15.

Изменение коэффициента мощности, емкости и тока утечки с температурой приведено на рис. 10-16. Кривые рис. 10-17 иллюстрируют величину коэффициента абсорбции и зависимость полного сопротивления от частоты для типичных конденсаторов с твердым диэлектриком и для танталовых конденсаторов с «твердым электролитом».

Конденсаторы с анодами из фольги

Основным достоинством танталовых электролитических конденсаторов фольгового типа является их высокая удельная емкость, отнесенная к единице объема. Эти конденсаторы по конструкции подобны алюминиевым электролитическим конденсаторам, за исключением того, что в качестве электродов в них использована танталовая фольга толщиной 12,5 *мк*. Тантал — инертный материал, который противо-

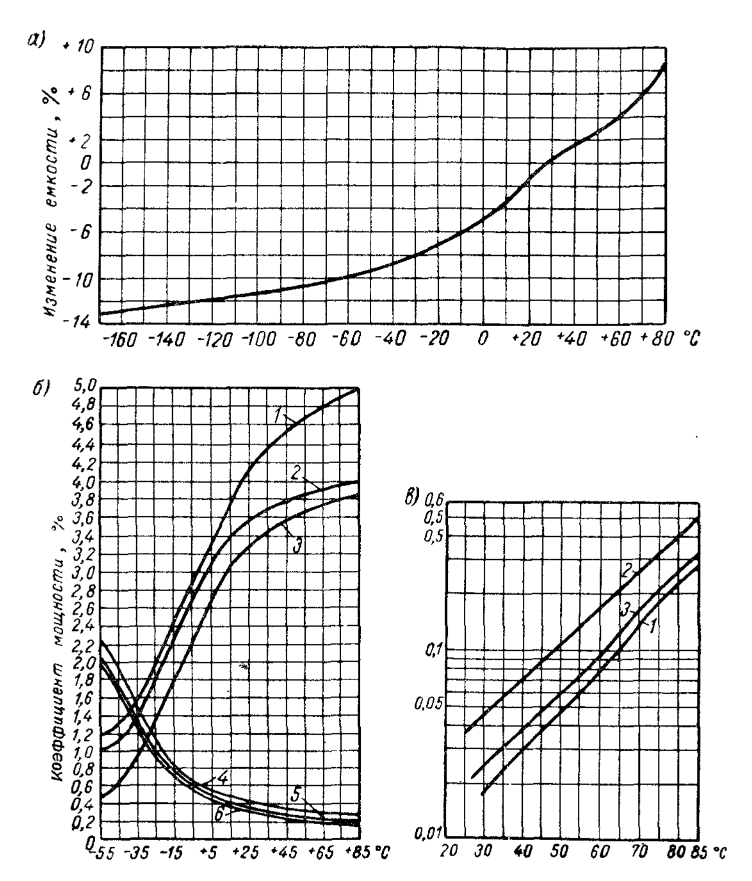
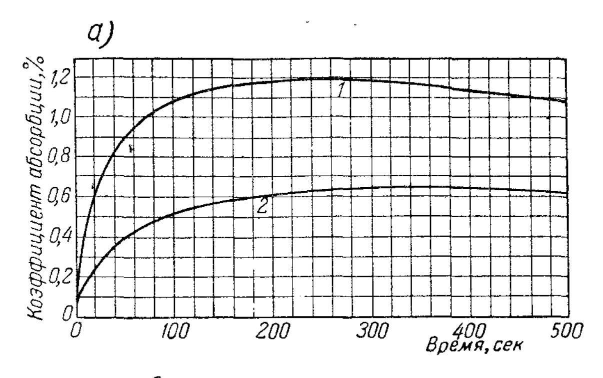


Рис. 10-16. Зависимость емкости, коэффициента мощности и тока утечки от температуры для конденсаторов различных типов фирмы «Спрейг»: *а* — емкость танталового конденсатора 0,01 *мкф*, 35 *в* (постоянный ток); по оси ординат отложено отклонение емкости от ее величины при +25° С; измерение при частоте 1 *кгц*; *б* — значения коэффициента мощности, полученные при частоте 1 *кгц*.

1 — танталовый конденсатор 0,0047 *мкф*, 35 *в*; *2* — то же, 0,01 *мкф*, 35 *в*; *3* — то же, 0,1 *мкф*, 35 *в*; *4* — бумажный конденсатор 0,0047 *мкф*, 200 *в*; *5* — то же, 0,01 *мкф*, 100 *в*; *6* — то же, 0,1 *мкф*, 100 *в*.

в — ток утечки танталовых конденсаторов; обозначения те же, что на рис. 10-16, *б*.



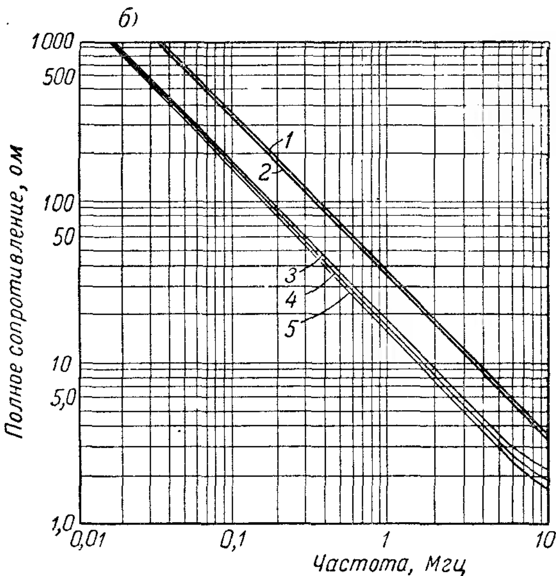


Рис. 10-17. Сопоставление значений коэффициента абсорбции и полного сопротивления для разных типов конденсаторов фирмы «Спрейг»: *а* — зависимость коэффициента абсорбции от времени после разряда конденсатора; время заряда 15 *мин* при 35 *в*, разряд 5 *сек* на сопротивление 100 *ом*.

1 — танталовый конденсатор емкостью 0,01 *мкф*; 2 — бумажный конденсатор такой же емкости.

б — зависимость полного сопротивления от частоты (*Мгц*).

1 — танталовый конденсатор 0,0047 *мкф*; 2 — бумажный конденсатор 0,0047 *мкф*; 3 — танталовый конденсатор 0,01 *мкф*; 4 — бумажный конденсатор 0,01 *мкф*; 5 — слюдяной конденсатор 0,01 *мкф*.

стоит воздействию большинства кислот и поэтому практически не корродирует в электролитах. Разделительной прокладкой обычно служат два слоя пористой прочной бумаги толщиной 12,5 *мк*, пропитанной электролитом. При разных номинальных напряжениях требуются различные электролиты. Для низковольтных конденсаторов пригоден раствор хлористого лития, обладающий малым удельным сопротивлением, а для конденсаторов среднего и высокого напряжения — электролиты с высоким удельным сопротивлением на основе янтарной или борной кислоты. Корпуса изготовляют из серебрёной латуни или меди. В настоящее время танталовые конденсаторы фольгового типа способны работать в диапазоне температур от —55

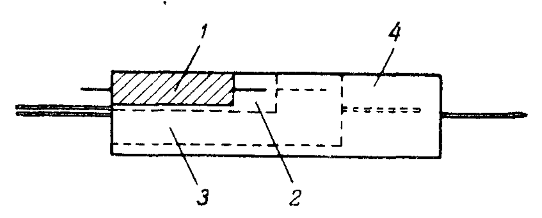


Рис. 10-18. Диаграмма сопоставления объемов цилиндрических конденсаторов.

1 — танталовый конденсатор; *2* — алюминиевый электролитический; *3* — металлобумажный; *4* — обычный бумажный с обкладками из фольги.

до +125° С при условии двойной герметизации (эластомер и политетрафторэтилен).

Односекционные фольговые конденсаторы с анодами из травленой фольги имеют емкость 1—580 *мкф* и номинальное напряжение 15—150 *в*, а с анодами из гладкой фольги — емкость 1—300 *мкф*, номинальное напряжение 3—150 *в*.

Фольговые конденсаторы могут быть как полярными, так и неполярными. Сравнение размеров танталового фольгового конденсатора с конденсаторами других типов (на рабочее напряжение 100 *в*) схематически показано на рис. 10-18.

Так как танталовая оксидная пленка очень стабильна, то подформовки после периода бездействия, как для алюминиевых конденсаторов, в данном случае не требуется, и конденсаторы выдерживают весьма длительный срок хранения. Полярные конденсаторы с травленой фольгой в корпусах длиной 19 *мм* и диаметром 17,5 *мм* имеют емкость

15 *мкф* при номинальном напряжении 15 *в* или 1 *мкф* при 150 *в*. Допуск по емкости составляет от —15 до +75%. Величина коэффициента мощности для конденсаторов из гладкой и травленой фольги с различной емкостью приведена на рис. 10-19.

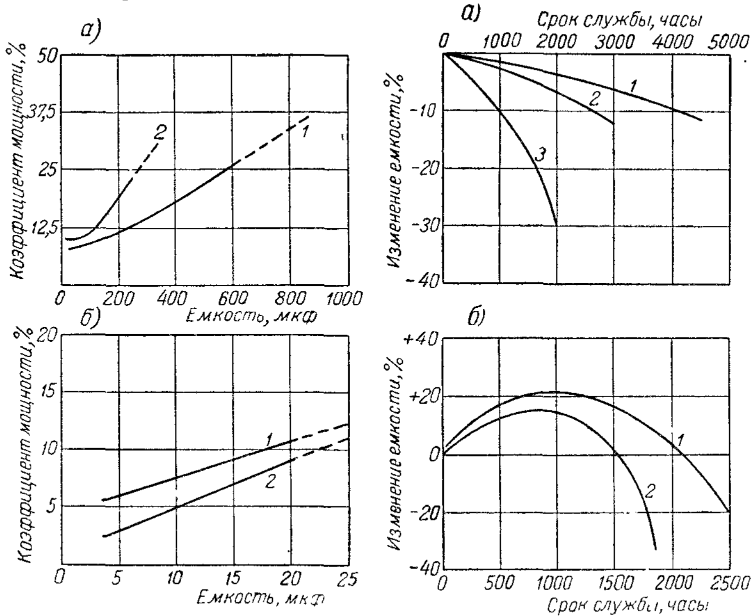


Рис. 10-19. Зависимость коэффициента мощности электролитических конденсаторов от номинальной емкости: *а* — травленые аноды.

1 — поляризованный тип; *2* — неполярный.

б — гладкие аноды.

1 — при 25° С; *2* — при 85° С.

Рис. 10-20. Зависимость емкости от срока службы для танталовых фольговых конденсаторов: *а* — полярный тип.

1 — травленая фольга, 60 *мкф*, 75 *в*; *2* — гладкая фольга, 18 *мкф*, 100 *в*; *3* — гладкая фольга, 4 *мкф*, 60 *в*.

б — неполярный тип.

1 — гладкая фольга, 5,5 *мкф*, 25 *в*; *2* — гладкая фольга, 1,5 *мкф*, 100 *в*.

Изменение емкости типичных конденсаторов с температурой показано в виде кривых на рис. 10-21. Зависимость емкости от срока службы типичных конденсаторов как с гладкой, так и с травленой фольгой полярного и неполярного типов показана на рис. 10-20.

Танталовые фольговые конденсаторы можно использовать в качестве конденсаторов связи или для развязки.

Когда они применяются в цепях, определяющих выдержку времени, то крутой фронт кривой напряжения может быть искажен вследствие изменения фазы за счет влияния после-

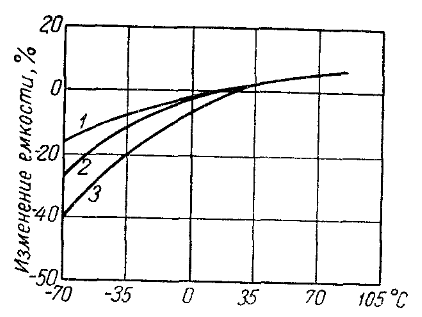


Рис. 10-21. Зависимость емкости танталовых фольговых конденсаторов от температуры.

1 — гладкая фольга, неполярный, 2 *мкф*, 75 *в*; 2 — травленая фольга, полярный, 40 *мкф*, 25 *в*; 3 — гладкая фольга, полярный, 3 *мкф*, 100 *в*.

довательного сопротивления. В случае использования конденсаторов при повышенных частотах потери начинают заметно возрастать в интервале от 1 до 10 *кгц*.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ВОЗДУШНЫЕ, ВАКУУМНЫЕ И ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ВОЗДУШНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Воздушные конденсаторы постоянной емкости используются главным образом в качестве лабораторных образцов емкости, в частности как высоковольтные образцы. Они могут быть и плоского, и цилиндрического типа. При изготовлении обоих вариантов конструкции основное внимание уделяют получению и поддержанию стабильности размеров. Конденсаторы из параллельно соединенных плоских пластин в принципе подобны прецизионным конденсаторам переменной емкости, рассчитанным на работу при одной заданной величине емкости; форма пластин может быть круглой, квадратной или треугольной.

В качестве твердого изоляционного материала применяют плавленый кварц; собранный конденсатор помещают в металлический корпус. Емкость воздушных конденсаторов составляет от 50 до 10 000 *пф*. Точность подгонки к номинальной величине емкости лежит в пределах 0,01—0,05% в зависимости от значения емкости и типа конструкции. У конденсаторов с емкостью выше 200 *пф* отклонение емкости от номинала составляет 0,01—0,02%. Возможное изменение емкости за несколько лет лежит в пределах от 0,01% для больших емкостей до 0,04% для малых.

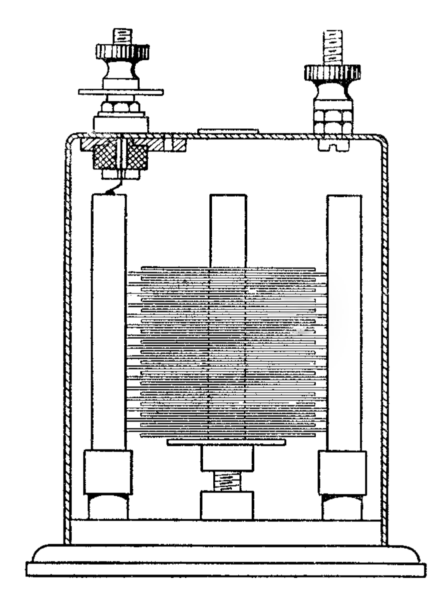


Рис. 11-1. Конструкция воздушного конденсатора постоянной емкости.

Миниатюрные типы воздушных конденсаторов, предназначенных для использования при верхнем пределе радиочастот, конструируют таким образом, чтобы индуктивность конденсатора и сопротивление его металлических частей были малыми.

Оба типа конденсаторов выпускают с температурной компенсацией, при этом температурный коэффициент емкости обычно ниже $10 \cdot 10^{-6}$ *град* [1].

В качестве примера европейской продукции можно привести конденсаторы постоянной емкости, выпускаемые голландской фирмой «Филипс», конструкция которых приведена на рис. 11-1. Две стопки круглых латунных пластин расположены горизонтально. Одна стопка припаяна к двум латунным стержням, изолированным от латунного основания, другая — к двум латунным стержням, соединенным с основанием; число пластин зависит от величины заданной емкости. Для точной подгонки емкости после окончательной регулировки пользуются небольшой латунной пластиной круглой формы, которую можно перемещать установочным

винтом. После окончательной подгонки винт стопорят. Для конденсаторов постоянной емкости этого типа максимальное отклонение от номинальной емкости при 20° С составляет +0,15%, а среднее значение температурного коэффициента емкости равно $25 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Максимальная величина тангенса угла потерь при частоте 1 *Мгц* не превышает 0,0003 при условии, что относительная влажность воздуха будет не более 75%. Образцовые конденсаторы этого типа изготовляют с различной емкостью: от 10 до 1000 *пф*.

Цилиндрический тип конденсатора с обкладками в виде концентрических цилиндров в принципе подобен вакуумным конденсаторам.

ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Использование вакуума в качестве конденсаторного диэлектрика не новость. Впервые вакуумные конденсаторы были разработаны в США, но в настоящее время их выпускают и в других странах, в частности в Англии. Применяют их главным образом как контурные конденсаторы или конденсаторы развязки в радиопередатчиках (включая самолетные) или в мощном электротермическом промышленном оборудовании.

Для повышения внутреннего пробивного напряжения между обкладками (в самолетной радиоаппаратуре) в конденсаторах используют глубокий вакуум. Рабочее напряжение в этом случае теоретически ограничивается величиной внешнего разрядного напряжения, которое зависит от плотности окружающего воздуха, от расстояния между внешними выводами конденсатора и от их формы. При промышленном использовании резкие колебания температуры и влажности на вакуумные конденсаторы не влияют. Эти конденсаторы можно изготовлять с большой механической прочностью и соответственно высокой стабильностью емкости.

Удельная емкость, отнесенная к единице объема, невелика, так как диэлектрическая проницаемость по существу та же, что и для воздуха. Емкость вакуумных конденсаторов ограничивается величиной 5000 *пф*, номинальный ток может достигать 225 *а*, а номинальное напряжение не превышает 120 *кв*. Величина допустимого номинального тока может быть увеличена вдвое при использовании форсированного воздушного или водяного охлаждения. Коэффи-

циент мощности мал, порядка 0,0002; он зависит от токов Фуко и джоулевых потерь в обкладках и выводах.

Вакуумные конденсаторы очень надежны; продолжительность срока их службы определяется временем сохранения вакуума. После пробоя диэлектрик восстанавливает электрическую прочность, поэтому если предельное напряжение будет превышено и произойдет внутренний пробой или разряд по поверхности, то работоспособность конденсатора сохранится. Однако он может быть поврежден, если пробой перейдет в длительно поддерживающуюся дугу. Величина электрической прочности высокого вакуума определяется материалом и формой электродов. Теоретически напряжение может быть увеличено до предела, соответствующего возникновению холодной эмиссии из электродов, но практически этого достигнуть не удается из-за выделения газов, поглощенных металлом электродов.

Основную трудность при конструировании представляет герметизация выводов. В ранних типах конденсаторов герметизация осуществлялась путем спая стекла с вольфрамом, а устройство для откачки было подобно тем, которые используются при изготовлении радиоламп. В некоторых вакуумных конденсаторах применяются цилиндрические электроды из меди, в других типах — из никеля.

Емкость, создаваемая двумя цилиндрическими концентрическими электродами, определяется по формуле

$$C = \frac{kl}{\lg \frac{r_2}{r_1}},$$

где C — емкость, *пф*;
l — длина электродов, *см*;
r_1 — радиус внутреннего электрода, *см*;
r_2 — радиус внешнего электрода, *см*;
k — постоянная.

В конструкциях с никелевыми электродами каждую из двух систем обкладок (электродов) монтируют на пластине, прикрепленной к коваровому кольцу, которое заваривают в стеклянную колбу. Конденсатор собирают под колпаком, заполненным азотом, чтобы предотвратить окисление никелевых электродов. Коваровые кольца спаивают со стеклом методом высокочастотного нагрева.

Обычно конденсаторы в течение нескольких часов подвергают воздействию температуры, приблизительно равной

400° С, и затем проводят их «тренировку». Этот процесс состоит из зарядки конденсатора относительно большой емкости и последующего разряда его через вакуумный конденсатор, соединенный последовательно с сопротивлением, ограничивающим ток разряда. Назначение этого процесса — очистка поверхности электродов. Эту операцию повторяют несколько раз, последовательно увеличивая зарядное напряжение до заданной высокой величины, которую конденсатор должен выдерживать, не давая внутренних разрядов.

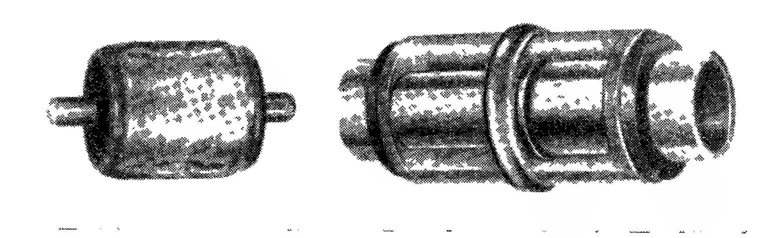


Рис. 11-2. Типичные вакуумные конденсаторы постоянной емкости фирмы «Долинко и Вилкинс».

Пропуская ток, сжигают бариевый геттер и выводы конденсатора заделывают методом холодной сварки: края металлической трубки сжимают между роликами под большим давлением. К торцовым выводам конденсатора припаивают мягким припоем контактные колпачки из серебрёной латуни.

Наилучшие характеристики вакуумных конденсаторов можно получить при небольших емкостях до 500 *пф*. При более высоких емкостях размеры конденсаторов значительно возрастают, процесс их производства усложняется, и опасными конкурентами для них становятся керамические конденсаторы.

Два типичных вакуумных конденсатора постоянной емкости показаны на рис. 11-2.

Можно привести следующие характеристики для типичного вакуумного конденсатора малой емкости фирмы «Долинко и Вилкенс»: длина 66,6 *мм*, диаметр 36,5 *мм*, максимальная емкость 50 *пф*, номинальное напряжение 15 *кв*.

Типичный вакуумный конденсатор большой емкости с медными электродами производства фирмы «Дженнингс

рэдио» имеет следующие характеристики: длина 234,3 *мм*, диаметр 127 *мм*, емкость 75, 100 и 125 *пф*, номинальное напряжение 60 *кв*, номинальный ток 175 *а*.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Газонаполненные конденсаторы используют главным образом как высоковольтные. Конструкция электродов обычно проста: внутренняя металлическая трубка размещена нужным образом внутри внешней стальной трубы. При напряжениях выше 150 *кв* принимают меры к улучшению распределения поля на внешней поверхности, в частности, применяют выравнивающие поле металлические колпаки на выводах конденсатора. Газ, заполняющий конденсаторы, обычно находится под давлением; нормальное рабочее давление около 10,5 $кГ/см^2$. Конденсаторы наполняют чистым и сухим воздухом или азотом. Типичный конденсатор с номинальным напряжением 250 *кв* емкостью 50 *пф* имеет угол потерь меньше 0,00001 радиана. Температурный коэффициент емкости выше, чем у вакуумных конденсаторов. Увеличение пробивного напряжения азота с ростом давления показано на рис. 11-3.

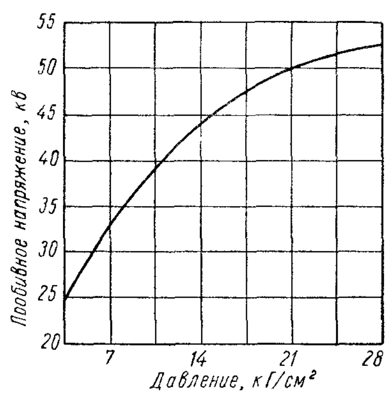


Рис. 11-3. Зависимость пробивного напряжения азота от давления.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ОПЫТНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ (РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА ДО 500° С)

Используя обкладки из нержавеющей стали толщиной 25 *мк*, сваренные с выводами из полосок такой же стали, в сочетании со слоями слюды в качестве диэлектрика, фирма «Дженерал электрик» создала конденсаторы, способные

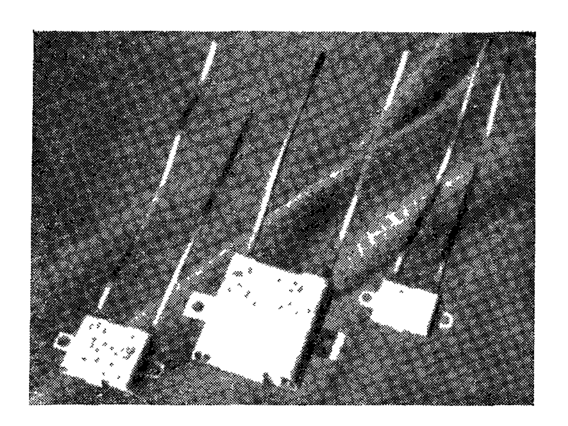


Рис. 12-1. Типичные слюдяные конденсаторы фирмы «Дженерал электрик», рассчитанные на работу при 500° С; номинальные емкости (слева направо): 0,01, 0,05 и 0,001 *мкф* при 250 *в* (постоянный ток).

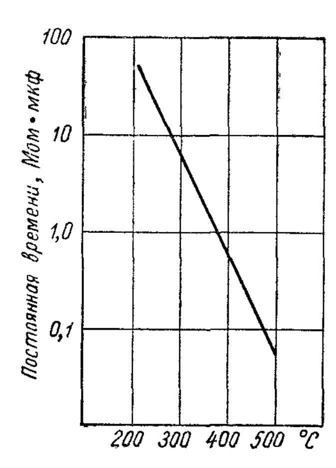


Рис. 12-2. Постоянная времени высокотемпературного слюдяного конденсатора до его испытания на срок службы.

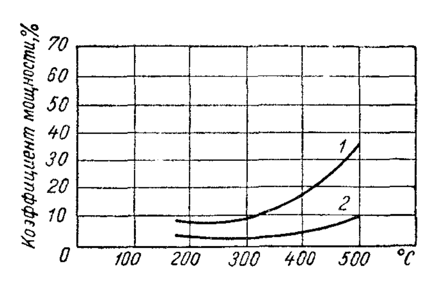


Рис. 12-3. Завнсимость коэффициента мощности высокотемпературного слюдяного конденсатора от температуры.

1 — при частоте 60 *гц*; *2* — при частоте 1 *кгц*.

работать при температуре 500° С. Конденсатор помещается в корпус из сплава «инконель»; конструкция корпуса допускает большое температурное расширение слюды при 500° С, обеспечивая минимальное изменение характеристик конденсатора. Диэлектриком служит слюда флогопит толщиной около 25 *мк*. Один из таких конденсаторов емкостью 0,01 *мкф* на рабочее напряжение 250 *в* постоянного тока сохранял работоспособность в течение 2000 *ч* при 500° С. Во время испытания в течение первых 1000 *ч* на конденсатор подавали напряжение 100 *в*, а в последующие 1000 *ч* — напряжение 200 *в*. Конденсаторы способны работать в течение 1000 *ч* при номинальном напряжении 250 *в* постоянного тока и температуре 500° С. Емкость таких конденсаторов лежит в пределах от 0,001 до 0,05 *мкф*. Типичные образцы показаны на рис. 12-1. Кривая изменения сопротивления изоляции этих конденсаторов с температурой приведена на рис. 12-2.

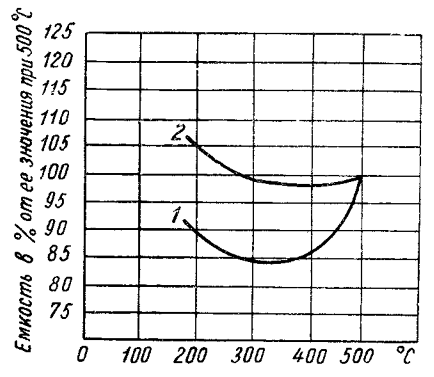


Рис. 12-4. Зависимость емкости от температуры для высокотемпературных слюдяных конденсаторов.

1 — при частоте 60 *гц*; *2* — при 1 *кгц*.

Так как потери слюды возрастают с температурой, коэффициент мощности конденсаторов сравнительно велик. Кривые изменения коэффициента мощности с температурой при частоте 60 и 1000 *гц* приведены на рис. 12-3, а зависимость емкости от температуры — на рис. 12-4. Удельная емкость, отнесенная к единице объема, относительно мала, поскольку объем конденсаторов емкостью 0,01 *мкф* составляет около 4,5 *см*^{3}. Конденсаторы могут работать в условиях воздействия радиации.

СТЕКЛЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ НАМОТАННОГО ТИПА

Фирма «Корнинг гласс» разработала по контракту с военным ведомством стеклянные конденсаторы емкостью 0,1 *мкф* на напряжение 600 *в* постоянного тока, намотанные из стеклянной ленты толщиной 38 *мк*. Стеклянную ленту и

алюминиевую фольгу наматывают на стеклянную оправку, помещенную в печь. Температура печи достаточно высока для того, чтобы разогреть стекло до точки размягчения. По конструкции такие конденсаторы подобны бумажным. Испытания на срок службы при температуре 125° С дали удовлетворительные результаты. Преимуществом конденсаторов этого типа является бóльшая, чем у стеклянных конденсаторов обычного плоского типа, удельная емкость в единице объема. Для защиты от действия влаги намотанную секцию необходимо помещать во влагостойкий корпус. Пока полученные результаты можно считать многообещающими, хотя еще предстоит усовершенствовать систему герметизации конденсатора и разработать технологию получения более тонкой стеклянной ленты.

АЛЮМИНИЕВЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

В США в одной из лабораторий военного ведомства был поставлен эксперимент по применению разработанной для изготовления танталовых конденсаторов с твердым электролитом (двуокись марганца) технологии к изготовлению конденсаторов с алюминиевым анодом. При этом использовали травленую алюминиевую фольгу высокой чистоты (99,99% Al) толщиной 100 *мк*. Анод формовали обычным методом, но на основе исследования формовочных электролитов была подобрана рецептура, позволяющая лучше контролировать электрические параметры готового конденсатора. Фольгу сначала подвергали формовке, а затем покрывали двуокисью марганца. Наиболее удачным методом покрытия двуокисью марганца оказалось пиролитическое разложение азотнокислого марганца. Чтобы осуществить электрический контакт с двуокисью марганца, поверх него наносили слой серебряной пасты. Затем из покрытой этими слоями фольги вручную наматывали опытные образцы конденсаторов.

В табл. 12-1 приведены приблизительные величины некоторых характеристик этих образцов только для их предварительного сравнения с обычными алюминиевыми и танталовыми конденсаторами.

Эта работа показывает, что такие конденсаторы можно изготовить на низкое напряжение (30 *в* и ниже).

Таблица 12-1

Характеристики алюминиевых конденсаторов с твердым электролитом (ручная намотка)

Наименование характеристики	Величина характеристик конденсаторов		
	алюминиевых электролитических по MIL-C-62	танталовых с твердым электролитом	алюминиевых с твердым электролитом
Изменение емкости в интервале температур:			
от +25 до −40° С . . .	−70%	−5%	−15%
от +25 до +85° С . . .	+20%	+3%	+7%
Ток утечки при 25° С, *мка/мкф · в*	0,04	0,0005—0,05	0,08
Величина произведения из эквивалентного последовательного сопротивления на емкость, *ом · мкф* . . .	600	20	160

Фирма «Бэлл телефон лэборатори» заключила контракт на продолжение этой экспериментальной работы и составила определенную программу по выбору окончательного варианта конструкции и изучению технологии изготовления конденсатора этого типа. Исследования проводятся на алюминиевой проволоке, на травленой фольге и на спеченных таблетках из алюминиевого порошка.

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С СОХРАНЕННОЙ И УДАЛЕННОЙ ПОДЛОЖКОЙ

В США разрабатываются тонкопленочные конденсаторы как с сохраненной, так и с удаленной подложкой; в ФРГ значительное развитие получил тип тонкопленочного конденсатора из полистирольной пленки, снятой с подложки. В обоих вариантах конструкции используются тонкие пленки толщиной от 1,5 до 10 *мк*. В тонкопленочных конденсаторах с сохраненной подложкой пленка наносится на поддерживающую основу, обычно в виде бумаги или пленки из майлара, которые предварительно металлизируются. После нанесения тонкопленочного диэлектрика добавляется вторая обкладка — обычно тонкий металлизированный слой. Затем осуществляется намотка конденсаторной секции. Проводилась также некоторая работа по использованию в качестве подложки ленты алюминиевой фольги.

На нее наносили тонкую пленку диэлектрика, которую затем подвергали металлизации, после чего из такой ленточной системы наматывали конденсатор.

В конструкции с удаленной подложкой тонкую пленку лака наносят сначала на поддерживающую основу (обычно бумагу), затем поверхность лаковой пленки металлизируют, оставляя на одном из краев неметаллизированную закраину. Конденсатор наматывают из двух металлизированных лент пленки, которые в процессе намотки отделяют от подложки.

В качестве диэлектрика в тонкопленочных конденсаторах можно использовать различные синтетические материалы, такие, как полистирол, ацетат целлюлозы и тефлон. Поскольку диэлектрик имеет малую толщину, конденсаторы отличаются большой удельной емкостью в единице объема. Эти низковольтные конденсаторы пригодны для использования в аппаратуре с транзисторами, где малые размеры и большая удельная емкость весьма выгодны для применения в фильтрах, контурах связи, интегрирующих устройствах, цепях времени и для определения частоты.

КОНДЕНСАТОРЫ ИЗ ДВУОКИСИ КРЕМНИЯ

Значительное развитие получило использование в качестве конденсаторного диэлектрика окислов кремния. Моноокись кремния медленно испаряется в атмосфере с контролируемым содержанием кислорода, образуя пленку толщиной около 9 *мк*, состоящую преимущественно из двуокиси кремния. Одна из американских фирм создала конденсаторы с диэлектриком из двуокиси кремния, нанесенным на основание из железоникелевого сплава, способные работать при температуре 200° С. Вторая обкладка в виде пленки алюминия или нихрома наносится на диэлектрик методом испарения в вакууме. Опытные конденсаторы, изготовленные по этой технологии, имеют следующие характеристики:

Сопротивление изоляции:
при 25° С . . . . 1000 *Мом · мкф*
при 200° С, приблизительно . . . . 1 *Мом·мкф*
Температурный коэффициент емкости:
при температуре ниже 120° С . . . . меньше $100 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
при температуре выше 120° С быстро возрастает, достигая при 190° С значения . . . . $300 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$

При испытании на срок службы при 200° С наблюдается значительное изменение емкости за первые 200 *ч*; хотя это изменение продолжается в течение последующих 1000 *ч* испытания, оно постепенно уменьшается с течением времени, а сопротивление изоляции возрастает с 10^2 до 10^5 *Мом*.

Пленка чувствительна к воздействию влаги, которая вызывает большое изменение емкости. Поэтому необходима герметизация конденсатора. В этой области потребуется еще значительная работа.

МИНИАТЮРНЫЕ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Фирма «Аэровокс» выпустила малогабаритные низковольтные металлобумажные конденсаторы для применения с транзисторами. Конденсаторы изготовляют намоткой из металлизированной лакированной крафт-бумаги толщиной 5 *мк* (толщина слоя лака 1 *мк*) и пропитывают кремнийорганической жидкостью. Эти конденсаторы имеют следующие характеристики:

Номинальное напряжение	50 *в*
Емкость	От 0,1 до 4 *мкф*
Постоянная времени.	
при 25° С	10 000 *Мом · мкф*
при 85° С	750 *Мом · мкф*
Изменение емкости с температурой в интервале от — 55 до +85° С	± 2%
Коэффициент мощности (максимальное значение при 1 *кгц*)	0,008

Объем этих конденсаторов на 50% меньше объема других металлобумажных конденсаторов с подобными же номинальными данными.

НОВЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Для получения конденсаторов с исключительно тонкой пленкой металлизированного диэлектрика в Англии экспериментально разработан процесс, который состоит в следующем.

Стеклянную поверхность металлизируют (серебром, медью или алюминием) одним из известных способов метал-

лизации, таким, как восстановление в водном растворе серебра, или испарением меди и алюминия в вакууме. Затем на металлизированную поверхность наносят диэлектрик в виде раствора методом окунания, распыления или способом «спиннинга». Последний предпочтителен, так как этим способом могут быть получены более однородные слои. При использовании метода «спиннинга» металлизированная стеклянная пластина вращается в горизонтальной плоскости, а раствор диэлектрика льется на пластину в центре ее вращения. При правильно выбранных условиях раствор распределяется по поверхности вращающейся пластины однородным слоем. Параметрами, регулирующими этот процесс, являются: концентрация раствора, вязкость, температура и скорость вращения. Чаще всего применяют скорость порядка 500 *об/мин.* Вращение продолжается несколько минут. За это время основная часть растворителя испаряется. Затем слой высушивают, а если надо, то запекают, после чего комбинацию из металла и диэлектрика снимают со стеклянной пластины. Для отделения от стекла применяют метод отмачивания в соответствующей жидкости (обычно в воде или спирте). После добавочной сушки металлизированная пленка готова для нарезки и сборки.

Преимуществом процесса является возможность получения тонких однородных пленок металлизированного диэлектрика толщиной 5 *мк* и тоньше. Кроме того, поскольку при этом методе диэлектрик наносится на металл, а не наоборот, как обычно (при металлизации тонких пленок), то сквозные отверстия в изолирующей пленке не будут заполняться металлом, образуя проводящие мостики. Такую технологию можно использовать для изготовления субминиатюрных конденсаторов для применения в транзисторной аппаратуре.

ТИТАНОВЫЕ АНОДИРОВАННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

На металлическом титане легко создается химически инертная оксидная пленка, аналогичная образующейся на алюминии, и возможно, что эта пленка может обладать подобными же изоляционными свойствами, за исключением диэлектрической проницаемости, которая в случае двуокиси титана весьма велика. Опытные конденсаторы были изготовлены в Англии следующим путем. Коммерческий титан

высокой чистоты формовали при постоянном токе в концентрированном растворе бихромата калия, фосфата калия или обычной поваренной соли. Оксидирование происходило при подъеме напряжения ступенями через 1,5 *в* в интервале от 6 до 10 *в*; на каждой ступени давали выдержку

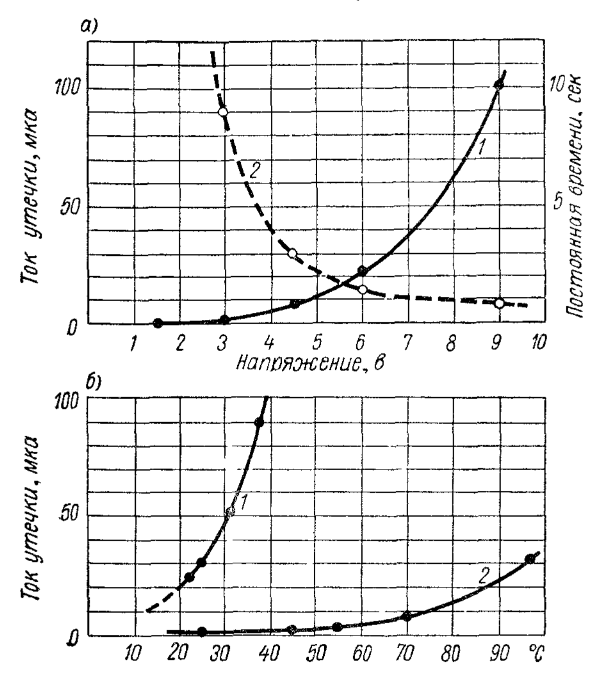


Рис. 12-5. Характеристики опытного конденсатора с титановым анодом: *а* — зависимость тока утечки (*1*) и постоянной времени (*2*) от напряжения; *б* — зависимость тока утечки от температуры.

1 — при напряжении 6 *в*; *2* — при напряжении 1,5 *в*.

до тех пор, пока ток не падал до постоянной величины, после чего переходили на следующую ступень напряжения.

Емкость круглых дисковых электродов диаметром 14 *мм* и толщиной 2 *мм* была равна 6 *мкф*, этому соответствовала эффективная удельная емкость на двойной площади 1,5 *мкф/см*^{2}. Однако рабочее напряжение составляло только около 6 *в*. Зависимость тока утечки от температуры приведена на рис. 12-5.

Влияние величины постоянного напряжения на емкость конденсатора показано на рис. 12-6; измерение емкости

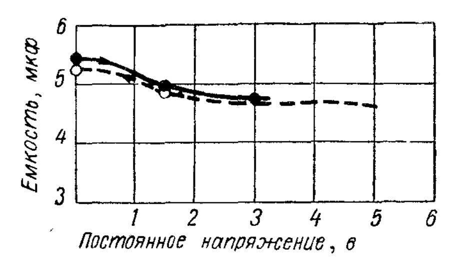


Рис. 12-6. Зависимость емкости. опытного титанового конденсатора от постоянного напряжения смещения при измерении на частоте 1,6 *кгц* (прямой и обратный ход).

производилось при частоте 1,6 *кгц*. Емкость зависит от малых величин наложенного постоянного напряжения, поэтому наличие заряда должно быть заметным до полного

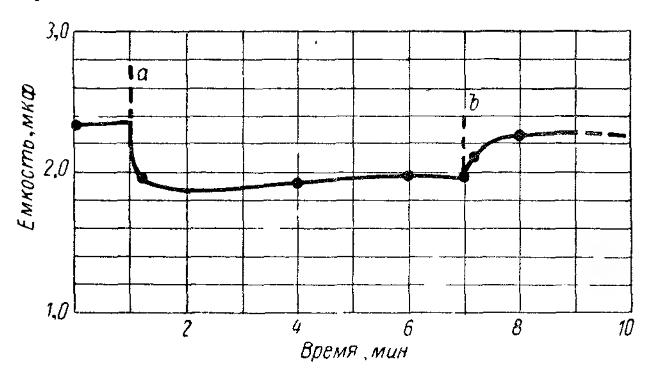


Рис. 12-7. «Эффект запоминания» в опытном титановом конденсаторе; в точке *a* мгновенно приложено напряжение 3 *в* постоянного тока; между точками *a* и *b* конденсатор оставался разомкнутым; после точки *b* конденсатор замкнут накоротко.

его стекания. Фактически остаточный заряд может существовать в течение длительного периода времени. Результат, полученный для двух титановых конденсаторов после первоначальной зарядки, показан на рис. 12-7.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНДЕНСАТОРАХ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Конденсаторы постоянной емкости имеют некоторые присущие им несовершенства, во многих случаях связанные с дефектами конструкции или являющиеся следствием недостаточного контроля в процессе производства. К наиболее часто встречающимся повреждениям относятся: нарушение герметичности; снижение срока службы, вызванное наличием остаточных загрязнений; снижение срока службы, вызванное миграцией серебра; возникновение шумов.

Нарушение герметичности — это наиболее часто встречающийся дефект конденсаторов постоянной емкости. Явление снижения сопротивления изоляции, вызванное проникновением влаги через неплотности защитных оболочек, хорошо известно. Для некоторых типов конденсаторов с бумажным, комбинированным или пленочным диэлектриком, опрессованных пластмассой или покрытых воскообразным компаундом, изменение влажности и температуры часто приводит к проникновению водяных паров внутрь конденсатора. Увлажнение идет или вдоль выводных проводников или непосредственно через толщу влагозащитного покрытия за счет молекулярной диффузии. Поглощенные пары остаются в конденсаторе в виде влажности, снижающей сопротивление изоляции, увеличивающей потери и способной привести к окончательной порче конденсатора.

Нарушение герметичности у конденсаторов с жидкой пропиткой приводит к вытеканию пропиточного вещества с последующим пробоем диэлектрика конденсатора. Если конденсаторы этого типа подвергаются воздействию температурных циклов, то герметизация должна обеспечить сохранность пропиточного вещества при его расширении и сжатии.

Для обеспечения надежной влагозащиты и предотвращения порчи конденсатора от воздействия тяжелых условий окружающей среды применяют металлические корпуса со стеклянными проходными изоляторами.

Снижение срока службы бумажных, комбинированных и пленочных конденсаторов постоянной емкости может быть

следствием попадания загрязнений в процессе производства. Необходимо избегать применения загрязненных примесями пропиточных веществ, неправильного применения и недостаточно тщательного удаления флюсов при пайке, а также применения диэлектрика низкого качества или с большим содержанием загрязняющих примесей.

Опрессованные серебрёные слюдяные конденсаторы выходят из строя в результате постепенного образования проводящих мостиков в диэлектрике или медленной миграции серебра по поверхности слюды. Каждое из этих явлений снижает сопротивление изоляции и приводит затем к пробою. Миграция может быть вызвана короной, возникшей вследствие недопустимо повышенного напряжения переменного тока, или наличием электролитических загрязнений в комбинации с влагой внутри корпуса.

В керамических серебрёных конденсаторах также могут происходить подобные образования проводящих путей или миграция серебра с течением времени с поверхности серебряных электродов. В некоторых случаях пробой может происходить по одному из путей утечки, созданных проникновением металла в керамику.

В электролитических конденсаторах трудности, связанные с появлением коррозии из-за утечки электролита через уплотнение корпуса, теперь устранены. Эти трудности возникали главным образом из-за дефектов сборки, которых в современном производстве уже нет. Высокий ток утечки часто вызывается расформовкой во время хранения, поэтому старые конденсаторы перед их использованием должны подвергаться подформовке.

Главной причиной выхода из строя алюминиевых электролитических конденсаторов обычно является электролит. Высыхание электролита при повышенных рабочих температурах вызывает возрастание коэффициента мощности и потерю емкости. При низких температурах электролит замерзает, что также дает высокий коэффициент мощности и снижение емкости. Возникновение любого вида коррозии обычно связано с наличием электролита. При конструировании оборудования необходимо устранить возможность появления перенапряжений на этих конденсаторах. С этой целью используют приемные лампы с косвенным подогревом, включатели с выдержкой времени и подобные им устройства, в противном случае при перенапряжениях

может возникнуть явление «искрения», приводящее к пробою конденсатора. Ток утечки и нежелательные появления пульсаций создают трудности при изготовлении высоковольтных конденсаторов. Неплотности конструкции можно устранить тщательной герметизацией корпуса, но толчки тока и возникновение шумов при эксплуатации конденсаторов остаются важной проблемой.

СЛУЧАЙНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ШУМА В КОНДЕНСАТОРАХ

«Пульсации» и случайные шумы, возникающие в конденсаторах, могут быть вызваны разными причинами. Они еще недостаточно изучены, особенно случайные вспышки шумов, которые нельзя обнаружить при обычных испытаниях. Отдельные причины появления шумов были точно определены проведенными исследованиями, и можно думать, что в других условиях они могут вызвать и случайные отдельные пульсации шумов, которые приводят к значительным ошибкам в работе цепей счетно-решающих устройств. При использовании для обычных целей те же самые конденсаторы оказываются вполне удовлетворительными.

Рассмотрим пять возможных причин возникновения шумов или случайных пульсаций тока.

1. **Внутренний разряд.** Наиболее известная причина — это начальный внутренний разряд, который предшествует обычному пробою. Явление разряда возникает в результате местной ионизации воздушных включений под влиянием высокой напряженности поля. При переменном напряжении это ведет к повторным разрядам, дважды за период напряжения: возникновение ионизации указывает на то, что напряженность поля в конденсаторе выше допустимой. При воздействии постоянного напряжения вспышки ионизации могут следовать одна за другой со значительным перерывом, во время которого напряжение на воздушном включении повышается до опасного значения вследствие стекания зарядов или общей релаксации диэлектрика.

Вполне возможно, что при постоянном напряжении такие местные вспышки ионизации будут возникать при напряженности поля, значительно более низкой, чем та, при которой

шумы, вызванные ионизацией, могут быть обнаружены обычными испытаниями, особенно если учесть большое время перерыва между вспышками. Шумы, вызванные этой причиной, можно снизить, уменьшив напряженность поля и применив последовательное соединение секций.

В плохо рассчитанных или неправильно собранных конденсаторах неполностью замкнутые пути утечки, выступающие края или острия, у которых могут возникать коронный и искровой разряды, очевидно, будут опасным источником шумов; это можно рассматривать как заметную и легко устранимую причину зарождения шумов.

2. Мерцание (Flutter). Мерцание является вполне вероятной причиной возникновения случайных шумов в серебрёных слюдяных и серебрёных керамических конденсаторах на радиочастоте. Оно выражается в виде случайных скачков емкости и, следовательно, запасаемого заряда. Это явление связано с неполной адгезией серебра к диэлектрику, в результате чего при воздействии термического расширения или механического удара часть площади, покрытой серебром, то отсоединяется от основной части обкладки, то снова присоединяется к ней.

Этой причины шумов не бывает в больших бумажных конденсаторах с фольговыми электродами, за исключением конденсаторов с вкладными выводами. При прохождении слабого тока такие, конденсаторы часто имеют ненадежный контакт между обкладкой и выводом, а потому их не следует применять в случаях, когда важно отсутствие шумов. Мерцание возможно в слюдяных и керамических конденсаторах, но в современных типах встречается редко. Правильная металлизация и в некоторых случаях дополнительное электролитическое осаждение металла устраняют этот дефект. Однако, исходя из природы данного дефекта, нельзя предполагать, что он не может появиться в результате неправильной эксплуатации конденсатора в тяжелых условиях. Тенденцию к этому можно обнаружить, подвергая достаточное количество образцов воздействию резкой смены температурных циклов при верхнем и нижнем пределах рабочей температуры.

3. Диэлектрическое последействие. В очень редких случаях явление последействия в диэлектрике (явление абсорбции) может вызывать вспышки шумов. К сожалению, это особенно заметно в случае таких хороших диэлектри-

ков, как полистирол и кварц. Напряженность поля исчезает не сразу во всем объеме диэлектрика, она сохраняется в отдельных его участках, где также постепенно происходит процесс релаксации; при этом исчезающий заряд воспринимается окружающей структурой диэлектрика и частично восстанавливает начальную его поляризацию. Проявление подобного процесса можно ожидать и при зарядке конденсатора, причем быстрое частичное ослабление напряженности можно рассматривать как возникновение импульсов напряжения. Для уменьшения этого эффекта можно использовать жидкие диэлектрики.

4. **Полимеризация.** Известно, что в таких пленочных материалах, как полиэтилен, полимеризация не закончена и продолжается со временем; при этом возникают местные напряженные участки, в которых напряженность может рассасываться постепенно или исчезать внезапно, в виде импульса.

5. **Радиация.** Воздействие радиоактивных излучений на все «хорошие» диэлектрики — полиэтилен, кварц, слюду — вызывает ионизацию, и, следовательно, служит потенциальной причиной возникновения шума, особенно в конденсаторах малой емкости. Интересно, что одиночный кристалл антрацена, чистый углеводород, является стандартной формой счетчика Х-лучей, причем возникающие колебания усиливаются фотоэлектрическим способом. Таким образом, если радиодетали из этих материалов подвергаются радиации, то в результате этого могут возникать некоторые шумы. Защиты от шумов такого вида нет, кроме тщательной экранировки и правильного расположения аппаратуры.

В сегнетоэлектриках возникает эффект, аналогичный эффекту Баркгаузена. Это хорошо изученное явление, вызывающее большие импульсы напряжения.

Этот перечень причин, вызывающих шумы, нельзя считать исчерпывающим; механическое перемещение электродов и преодоление трения при тепловом расширении также могут генерировать шум как за счет изменения емкости или контактного сопротивления, так и за счет трибоэлектрического явления. Тем не менее этот перечень включает основные помехи, вызывающие шумы, и учитывает преимущественно те причины возникновения шумов при низких частотах, которые нельзя вскрыть при обычных испытаниях конденсаторов.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Дальнейшее развитие конденсаторов должно предусматривать повышение надежности, уменьшение габаритов, расширение интервала рабочих температур, создание конденсаторов, пригодных для работы в среде с повышенной радиацией, улучшение стабильности (при воздействии температуры, частоты, при испытании на срок службы и т. д.). Эти задачи определяются непрерывно возрастающим усложнением электронного оборудования, например внедрением транзисторов, а также более жесткими условиями эксплуатации военного электронного оборудования.

БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В процессе развития бумажных конденсаторов должны повышаться главным образом надежность, удельная емкость и стабильность, в частности при низких температурах. В области изготовления более надежных бумажных конденсаторов уже есть значительные достижения. Необходимо в дальнейшем усилить контроль за процессом производства с тем, чтобы гарантировать точное выполнение всех операций в соответствии с узаконенным технологическим процессом и достаточную степень чистоты, исключающую какие бы то ни было загрязнения. В настоящее время выпускают высоконадежные бумажные конденсаторы, предусмотренные спецификацией MIL-C-14157, для использования в ракетной технике и авиации. Эти конденсаторы в большинстве случаев намотаны из одного слоя полиэтилентерефталата и двух или более слоев бумаги.

За последние несколько лет пропиточные вещества, используемые в бумажных конденсаторах, претерпели значительные изменения. Требования более высокой величины сопротивления изоляции, так же как и требование более высокой рабочей температуры для бумажных конденсаторов (характеристика *К* по спецификации MIL-C-25), привели ко все большему использованию в качестве пропиточных масс кремнийорганических жидкостей и полиизобутиленов. Однако все эти пропиточные вещества отличаются нежелательными характеристиками: они повышают

коэффициент мощности и изменяют емкость (обычно в результате изменения диэлектрической проницаемости) при температуре —55° С. Идеальная пропиточная масса должна по возможности сочетать многие из лучших характеристик существующих масс: высокую удельную емкость в единице объема, обеспечиваемую касторовым маслом; невоспламенимость и длительный срок службы при химической стабильности, характерные для пентахлордифенила (со стабилизацией); высокое сопротивление изоляции, свойственное полиизобутилену; термическую стабильность кремнийорганических жидкостей; линейность изменения диэлектрической проницаемости с температурой, присущую некоторым минеральным маслам.

Одна из американских фирм, работающих над созданием такой идеальной пропиточной массы, нашла новый пропитывающий материал в виде эфира, представляющего собой ди (ψ'-гептил)-3-метилглутарат. Характеристики опытного конденсатора, пропитанного этим материалом, приведены в табл. 14-1.

Таблица 14-1

Характеристики конденсатора, пропитанного ди (ψ'-гептил)-3-метилглутаратом

t, ° С	Емкость, *мкф*	Коэффициент мощности, %	Постоянная времени, *Мом·мкф*
55	3,12	1,80	760 000
25	3,04	0,36	4 200
35	2,99	0,40	180

Конденсатор после пропитки запасает при 25° С несколько больше энергии, чем эквивалентный конденсатор, пропитанный пентахлордифенилом, причем оба эти конденсатора запасут энергии на 45—50% больше, чем аналогичный конденсатор, пропитанный минеральным маслом. Однако при температуре — 55° С конденсатор, пропитанный ди(ψ'-гептил)-3-метилглутаратом, запасет энергии на 45—50% больше, чем любой из конденсаторов двух остальных типов. На рис. 14-1 сравниваются температурная зависимость коэффициента мощности и емкости аналогичных конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом и ди(ψ'-гептил)-3-метилглутаратом.

Испытание на срок службы в течение 250 *ч* при напряжении, равном 1,3 $U_{ном}$, и температуре 85° С показало, что

емкость опытных конденсаторов изменилась на 1,6—5,6%, а постоянная времени осталась без изменения. Пропиточная масса огнестойка, термически стабильна, имеет малую вязкость, не воздействует на кожные покровы и не вызывает набухания резины и пластмассы или появления у нее липкости. Продолжаются дальнейшие исследования с целью создания бумажных конденсаторов, способных работать при более высоких температурах и более высоких напряжениях.

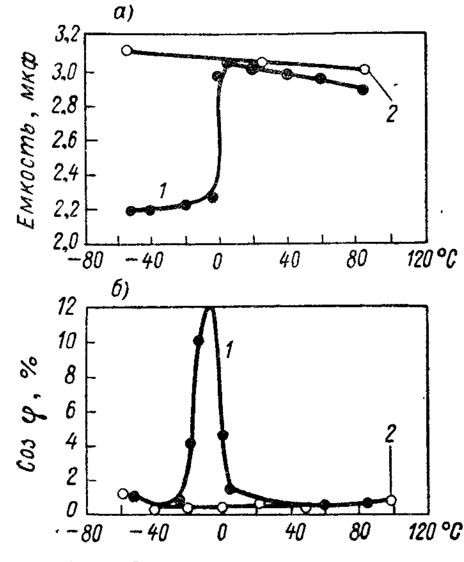


Рис. 14-1. Сравнение характера зависимости емкости (*а*) и коэффициента мощности (*б*) от температуры для бумажных конденсаторов с различными видами пропитки.

1 — пентахлордифенил; *2* — ди(ф-гептил)-3-метилглутарат. Измерения при частоте 60 *гц*.

МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Изменения в конструкции значительно улучшили электрические параметры металлобумажных конденсаторов. Использование одного слоя полиэтилентерефталата и лакированной бумаги позволило заметно улучшить сопротивление изоляции и увеличить срок службы. Некоторые новейшие типы металлобумажных конденсаторов, освоенных в производстве, по своим характеристикам приближаются к конденсаторам с обкладками из фольги.

Дальнейшие усилия надо направить на улучшение характеристик существующих типов, а также на разработку и улучшение малогабаритных низковольтных конденсаторов для использования в транзисторных схемах.

Можно ожидать более широкого применения металлизированных конденсаторов и вытеснения ими обычных фольговых конденсаторов во многих областях техники.

Новые разработки могут идти в двух направлениях: одно из них — улучшение качества диэлектрика (слюды), другое — усовершенствование конструкции конденсатора.

Слюда — природный продукт со сложной структурой, поэтому ее свойства отчасти случайны. На характеристики слюды заметно влияет наличие загрязнений и воздушных включений, поэтому при использовании ее в качестве диэлектрика необходим исключительно тщательный отбор слюды.

Существующие методы отбора позволяют провести такую разбраковку слюды, которая обычно обеспечивает удовлетворительные значения коэффициента мощности и электрической прочности, но не дает достаточно низких значений температурного коэффициента емкости. Измерения ТКЕ на партии пластинок серебрёной слюды показывают, что значения ТКЕ могут заметно различаться по величине, хотя во всех других отношениях пластины слюды вполне идентичны. Измерение температурного коэффициента для каждой пластины перед сборкой их в конденсатор достаточно трудоемко и экономически мало приемлемо. Поэтому было бы выгодно установить связи между ТКЕ и какой-либо другой более просто измеряемой характеристикой или разработать более быстрый способ испытания для оценки величины ТКЕ.

Слюда как диэлектрик известна многие годы, однако еще существует необходимость широкого исследования ее свойств, так как многие явления изучены недостаточно. Например, при высоких температурах (свыше 200° С) коэффициент мощности пластинок серебрёной слюды значительно увеличивается, а сопротивление изоляции падает. При охлаждении сопротивление изоляции увеличивается быстро, но коэффициент мощности требует нескольких часов для того, чтобы восстановить исходное низкое значение. Причина этого неизвестна, а так как при серебрении и опрессовке развиваются достаточно высокие температуры, то данный эффект вызывает затруднения в процессе производства.

Следующей проблемой является возрастание коэффициента мощности некоторых слюдяных серебрёных конденсаторов при высоких частотах. Этот эффект изучается; он связан, по-видимому, с природой серебрения.

Однако наибольшая возможность для развития заключена в усовершенствовании технологии процесса превра-

щения диэлектрика в готовые конденсаторы. Материалы и методы конструирования выбирают прежде всего так, чтобы получить механически прочный и герметичный конденсатор. К сожалению, применяемые для этого процессы часто приводят к ухудшению свойств конденсатора, и превосходные характеристики слюды как диэлектрика могут быть в значительной степени утрачены. Когда объем влагозащитного покрытия оказывается сравнимым с объемом защищаемого диэлектрика, то существующие стандартные типы слюдяных конденсаторов становятся малоэффективными. При правильном конструировании допустимо заметное уменьшение общих размеров без ухудшения характеристики конденсатора.

Новый подход к оценке слюды как диэлектрика, а также улучшение опрессовочного материала и метода оформления выводов привело к появлению двух направлений в разработке и изготовлении конденсаторов для высокой температуры. Фирма «Дюбилье» выпускает два типа конденсаторов с осевым расположением выводов для работы при номинальном напряжении и температурах 130 и 160° С. Эти конденсаторы собирают в корпусах тех же размеров и с теми же температурными коэффициентами, которые предусмотрены спецификацией MIL-C-5 для конденсаторов с осевыми выводами. Слюда после сборки пакетов не подвергается пропитке воскообразным компаундом.

Фирма «Дженерал электрик» создала слюдяной конденсатор, способный работать при температуре 500° С со сроком службы более 1000 *ч*. Дополнительные сведения об этом конденсаторе приведены в гл. 11.

Ведутся исследования возможностей использования слюдяных бумаг для изготовления высоковольтных конденсаторов. Уже разработаны конденсаторы в интервале температур от 300 до 350° С, имеющие постоянную времени не менее 4 *Мом · мкф*. Будут продолжаться исследования по дальнейшему применению слюды и слюдяных бумаг для работы при высоких температурах.

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Значительные успехи достигнуты в области разработок керамических диэлектриков. Эти разработки можно подразделить следующим образом: а) исследования и разработка новых материалов; б) создание новых конструкций

конденсаторов и усовершенствование технологии производства.

Много сделано для повышения стабильности материалов с высокой диэлектрической проницаемостью при изменении температуры, частоты, напряжения, а также с течением времени. Исследуются окись магния, окись алюминия и нитрид бора. При использовании этих материалов можно надеяться на получение постоянной времени более 5 *Мом · мкф* при 500° С. Анализ некоторых методов изготовления показывает, что величина RC зависит от давления, приложенного к диэлектрику, и от наличия зазора между диэлектриком и электродом.

Предварительное изучение показало, что окись алюминия при воздействии интенсивного излучения не приобретает необратимых изменений, хотя и наблюдается значительное увеличение тока утечки. Дополнительные исследования воздействия облучения на этот и другие материалы будут продолжены.

Недавно открытая новая керамика типа перовскита имеет диэлектрическую проницаемость свыше 1000 в интервале температур от —60 до +250° С. При 25° С и частоте 1 *кгц* коэффициент рассеивания равен 3%, в то время как при +250° С он составляет 0,2%. Удельное объемное сопротивление при + 250° С составляет около $7 \cdot 10^{11}$ *ом · см.*

Идут дополнительные исследования этого материала и родственных ему соединений с целью разработки керамического конденсатора с электрическими характеристиками, сходными с характеристиками бумажного конденсатора, но с более широким интервалом рабочих температур и с удельной емкостью, отнесенной к единице объема, от 0,012 до 6 *мкф/см*^{3}.

На начальной стадии находится разработка малогабаритных низковольтных керамических конденсаторов с многоленточными обкладками. Бумажную ленту покрывают керамической массой для получения непрерывно наматываемых тонких керамических слоев, разделенных бумагой, и окружают керамическим чехлом для создания необходимой прочности. При выжигании бумаги остаются щели, в которые может быть введен материал электродов. Ленты при намотке сдвигают с таким расчетом, чтобы получить возможность последующего присоединения выводов к обкладкам разных знаков. Потребуется еще значитель-

ная дополнительная работа для того, чтобы внедрить этот способ в практику изготовления конденсаторов.

Дальнейшие исследования, по-видимому, будут направлены на получение, во-первых, материалов для изготовления термокомпенсирующих конденсаторов с широким интервалом рабочих температур и малым разбросом величин температурного коэффициента, а во-вторых, керамических материалов, способных работать при напряженности поля свыше 20 *кв/мм* (с колебанием величины ε менее чем на 10%), для конденсаторов с большим запасом энергии.

СТЕКЛЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Дальнейшие разработки будут направлены прежде всего на улучшение конструкции существующих типов стеклянных конденсаторов. Эти конденсаторы могут иметь очень малые размеры, а конструкция их весьма рациональна, так как для изготовления защитного покрытия используется тот же самый материал, который применяется и в качестве диэлектрика. Другое преимущество состоит в том, что стекло, будучи синтетическим продуктом, может быть изготовлено со значительной степенью постоянства качества, в результате чего конденсатор получит высокую степень стабильности и обратимость характеристик.

Стеклянные конденсаторы типа «почтовая марка», выпускаемые в настоящее время, имеют более высокие температурные коэффициенты, чем эквивалентные слюдяные конденсаторы. Этот недостаток можно устранить путем разработки новых рецептур стекла.

Электрические характеристики стеклоэмалевых конденсаторов, выпускаемых в настоящее время, подобны характеристикам стеклопленочных конденсаторов. Фирма «Корнинг гласс» разработала стеклопленочные конденсаторы намотанного типа. Дополнительные сведения о них приведены в гл. 11.

В будущем необходимо добиваться разработки и использования стекла в виде тонких лент, получения рецептур стекла, пригодного для использования при повышенных рабочих температурах, и стекла со сниженным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости.

КОНДЕНСАТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИКОМ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

За последние несколько лет в этой области достигнут значительный прогресс. В настоящее время выпускают конденсаторы с диэлектриком из полистирола, политетрафторэтилена, ацетата целлюлозы и полиэтилентерефталата. Проводится работа по внедрению в производство металлизированных политетрафторэтиленовых конденсаторов. Изготовление полистирола, так же как и других пленок толщиной 1 *мк* или даже меньше, с помощью нового технологического приема должно обеспечить возможность выпуска низковольтных конденсаторов с высокой удельной емкостью. Основная цель новых разработок в этой области состоит в том, чтобы получить конденсатор со следующими характеристиками:

1) коэффициент мощности для конденсаторов емкостью меньше 0,1 *мкф* — не более 0,0015 при 100 *кгц*, для конденсаторов емкостью 0,1 *мкф* и выше — не более 0,005 при 1 *кгц*;

2) сопротивление изоляции при 25° С для конденсаторов емкостью менее 0,1 *мкф* — более $1 \cdot 10^5$ *Мом*, постоянная времени для конденсаторов емкостью 0,1 *мкф* и выше — более $1 \cdot 10^4$ *Мом·мкф*;

3) сопротивление изоляции при 85° С для конденсаторов емкостью менее 0,1 *мкф* — более $1 \cdot 10^4$ *Мом*, постоянная времени для конденсаторов емкостью 0,1 *мкф* и выше — более $1 \cdot 10^3$ *Мом·мкф*;

4) удельная емкость — до 3 *мкф/см*^{3} для конденсаторов емкостью 0,1 *мкф* и более; не менее 1 *мкф/см*^{3} для емкостей менее 1 *мкф*;

5) отношение длины корпуса к его ширине и длины к его толщине не должно превышать трех;

6) емкость — от 0,015 до 4 *мкф*;

7) номинальное напряжение должно быть равным 50 *в* постоянного тока.

Дальнейшие исследования надо направить: на улучшение существующих пленок (толщиной 6,5 *мк* и выше) и технологии их металлизации; на разработку и изготовление тонких пленок (толщиной от 0,1 до 2 *мк*); на создание необходимой технологии для использования таких пленок при изготовлении спирально намотанных конденсаторов; на разработку новых пленочных диэлектриков и новых улучшенных пропиточных веществ.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Существуют два основных направления новых разработок: 1) улучшение алюминиевых фольговых типов; 2) использование других анодных материалов.

На основании проведенных исследований можно заключить, что качество и надежность алюминиевых фольговых конденсаторов определяются главным образом степенью чистоты использованных материалов. Будущие разработки в значительной степени связаны с экономическими соображениями. Производство высоконадежных алюминиевых фольговых конденсаторов требует строгого контроля на всех технологических операциях и поддержания исключительной чистоты.

Изучение материалов, пригодных для замены алюминия, привело в прошлом к разработке танталовых конденсаторов. Этот тип конденсатора обладает более широким рабочим интервалом температур, но более низким рабочим напряжением на одну секцию. Будут продолжаться исследования других материалов с целью использования их для электролитических конденсаторов. Например, ниобий представляется достаточно перспективным. Этот материал обеспечивает более высокую удельную емкость, чем тантал. Дальнейшие исследования должны быть направлены: на разработку низковольтных алюминиевых фольговых конденсаторов с твердым электролитом (подобных танталовым типам); на повышение рабочего напряжения танталовых конденсаторов с твердым и жидким электролитом; на создание новых типов электролитов, как жидких, так и твердых; на изучение новых анодных материалов, например ниобия, карбида кремния и др.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ
КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Основные сведения о емкости, диэлектрической проницаемости, потерях в диэлектриках, электрической прочности, влиянии частоты на диэлектрики и конденсаторы, о сопротивлении изоляции, токе утечки и полном сопротивлении конденсаторов переменной емкости можно найти в гл. 2, так как приведенные в ней данные относятся к конденсаторам и постоянной, и переменной емкости.

СПЕЦИФИКАЦИИ США

Для конденсаторов переменной емкости, как и для конденсаторов постоянной емкости, имеются два основных вида спецификаций, используемых в настоящее время в США: разработанные Департаментом обороны (военная серия) для военного электронного оборудования и разработанные Объединением электронной промышленности (EIA) для коммерческого электронного оборудования.

Спецификации Департамента обороны

Департаментом обороны опубликованы следующие спецификации на конденсаторы переменной емкости:

MIL-C-81:	Керамические конденсаторы переменной емкости.
MIL-C-92:	Воздушные конденсаторы переменной емкости (подстроечные конденсаторы).

MIL-C-14409: Конденсаторы переменной емкости (пистонный тип, цилиндрические подстроечные).

MIL-C-26235 (USAF): Воздушные конденсаторы переменной емкости для настройки контуров.

Спецификации EIA

Объединение электронной промышленности (EIA) опубликовало следующие спецификации для использования их в электронной технике:

REC-101: Воздушные конденсаторы переменной емкости, класс B.

REC-106A: Воздушные конденсаторы переменной емкости, класс A.

АНГЛИЙСКИЕ СПЕЦИФИКАЦИИ

Могут представлять интерес и английские спецификации на конденсаторы переменной емкости, приведенные ниже. Англия имеет две основные группы спецификаций, используемых в настоящее время:

1) разработанные Комитетом стандартизации радиодеталей (RCSC) для военных целей (эквивалентны военным спецификациям MIL в США);

2) составленные Советом радиопромышленности (RIC) для использования в коммерческом электронном производстве (эквивалентны спецификациям EIA в США).

Спецификации RCSC

RCL 141: Перечень воздушных прецизионных конденсаторов переменной емкости.

RCS 141: Требования к воздушным прецизионным конденсаторам переменной емкости.

DEF 5143: Воздушные прецизионные конденсаторы переменной емкости.

Спецификации RIC

RIC 141: Воздушные конденсаторы переменной емкости для настройки контуров.

RIC 142: Воздушные конденсаторы переменной емкости, подстроечные.

RIC 143: Воздушно-слюдяные конденсаторы переменной емкости, подстроечные.

ОБОЗНАЧЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Широко применяемые условные обозначения переменных конденсаторов, перечисленные в стандарте MIL-STD-15A «Электрические и электронные условные обозначения», приведены на рис. 15-1.

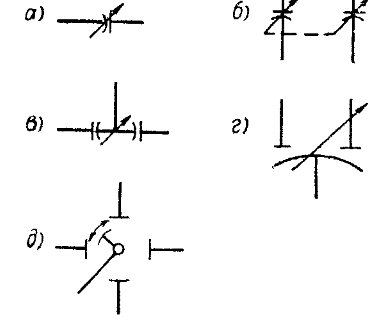


Рис. 15-1. Условные обозначения конденсаторов переменной емкости: *а* — подстроечный или переменный конденсатор; если надо специально подчеркнуть, что конденсатор подстроечный (триммер), то возле обозначения ставится буква «Т»; *б* — два переменных механически связанных конденсатора; *в* — конденсатор с расщепленным статором; емкость обеих частей увеличивается одновременно; *г* — дифференциальный конденсатор; если емкость одной его части увеличивается, то емкость второй уменьшается; *д* — фазосдвигающий конденсатор.

В этих обозначениях полукруглый электрод соответствует подвижной обкладке переменного или подстроечного конденсатора.

МАРКИРОВКА

Конденсаторы переменной емкости в соответствии с требованием спецификаций MIL-C-81, MIL-C-92 и MIL-C-14409 маркируются с полным типовым обозначением и указанием фирменного знака или названия фирмы.

ЗАКОНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЕМКОСТИ С УГЛОМ ПОВОРОТА РОТОРА

Изменение емкости с углом поворота ведущей оси определяется формой очертания неподвижных и подвижных пластин. Обычно применяют четыре основные зависимости $C = f(\theta)$:

1) линейное изменение емкости (прямолинейный конденсатор: SLC);

2) линейное изменение частоты или обратноквадратичный закон изменения емкости (прямочастотный конденсатор: SLF);

3) линейное изменение длины волны или квадратичный закон изменения емкости (прямоволновый конденсатор: SLW);

4) логарифмический или экспоненциальный закон изменения емкости (логарифмический конденсатор: Exp).

При специальном проектировании возможны и другие зависимости, например прямопроцентночастотная или пря-

мопроцентноволновая, которые иногда используются в приемниках и измерительном оборудовании. Гриффитс в 1926 г. вывел основные уравнения, характеризующие зависимость емкости от угла поворота оси ротора, для ряда конструкций переменных конденсаторов. Эти уравнения приводятся ниже.

Прямолинейный конденсатор

Если используются полукруглые пластины, то изменение емкости с поворотом оси ротора подчиняется прямолинейному закону:

$$C_1 = a_1 \theta + b_1,$$

где C_1 — емкость;

θ — угол поворота, *град*;

a_1 — постоянная, определяющая наклон прямой линии;

b_1 — постоянная, определяющая начальное положение прямой линии.

Поскольку имеется поле рассеяния у краев пластин, то, как видно из рис. 15-2, прямолинейный закон хорошо со-

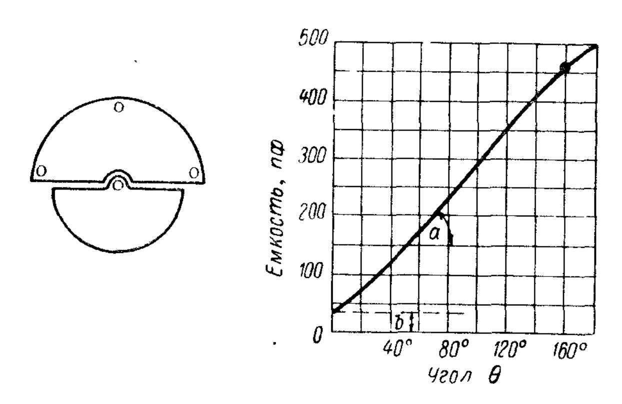


Рис. 15-2. Прямоемкостный конденсатор.

храняется только в среднем участке зависимости. На протяжении нескольких угловых градусов в начале и конце шкалы наблюдается отклонение от линейной зависимости.

Исправленный квадратичный закон

Для того чтобы зависимость длины волны от величины отсчета по шкале подчинялась прямолинейному закону, величина емкости в любой точке шкалы должна быть пропорциональна квадрату отсчета по шкале. Однако пластины с формой очертания, точно подчиняющейся квадратичному закону, мало используются в практике, потому что при них не учитывается начальная емкость конденсатора; применяют корректированный закон изменения емкости, который был расчитан Гриффитсом (рис. 15-3).

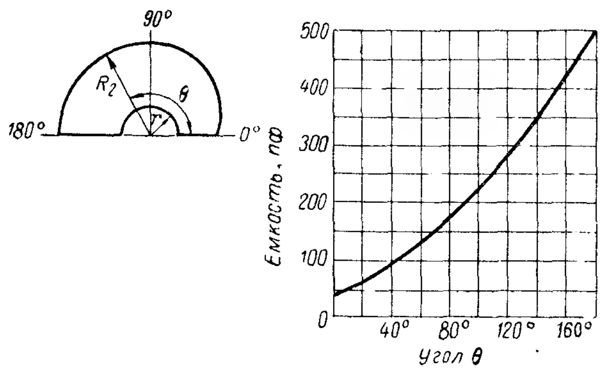


Рис. 15-3. Прямоволновый конденсатор (квадратичный закон).

В данном случае изменение емкости подчиняется следующему закону:

$$C_2 = (a_2\,\theta + b_2)^2.$$

Площадь перекрытия пластин

$$S_\theta = k\,[(a_2\,\theta + b_2)^2 - C_{\text{нач}}] + K\theta$$

(при значении угла поворота θ).

Радиус ротора

$$R_2 = \{114{,}6[2k\,a_2(a_2\theta + b_2) + K]\}^{\frac{1}{2}}.$$

Постоянные a_2, b_2, k и K имеют следующие значения:

$$a_2 = \frac{\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{нач}}}}{180}, \qquad b_2 = \sqrt{C_{\text{нач}}},$$

$$k = \frac{S_{\text{макс}} - 180K}{C_{\text{макс}} - C_{\text{нач}}}, \quad K = \frac{r^2}{114{,}6},$$

где r — радиус выреза в пластинах статора для оси ротора.

Прямочастотная зависимость

В супергетеродинных приемниках биения управляются разностью частот. Поэтому шкала конденсатора настройки должна быть равномерно градуирована по частоте, т. е. требуется прямолинейная зависимость между изменением частоты и приращением отсчета по шкале. Форма пластин

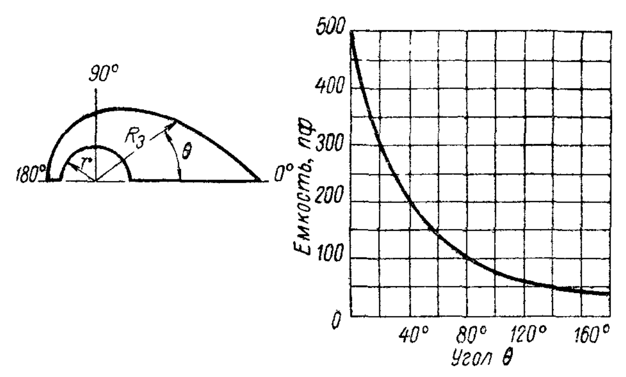


Рис. 15-4. Прямочастотный конденсатор (обратноквадратичный закон).

для этого случая приведена на рис. 15-4. Емкость конденсатора изменяется по следующему закону:

$$C_з = \frac{1}{(a_з\theta + b_з)^2}.$$

Площадь перекрытия пластин

$$S_\theta = k\left[\frac{1}{(a_з\theta + b_з)^2} \quad C_{нач}\right] + K(180 - \theta).$$

Радиус пластины ротора

$$R_з = \left\{114,6\left[\frac{2ka_з}{(a_з\theta + b_з)^3} + K\right]\right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Значения постоянных $a_з$, $b_з$, k и K будут следующими:

$$a_з = \frac{1}{180}\left[\frac{1}{\sqrt{C_{нач}}} - b_з\right], \qquad b_з = \frac{1}{\sqrt{C_{макс}}},$$

$$k = \frac{S_{макс} - 180K}{C_{макс} - C_{нач}}, \qquad K = \frac{r^2}{114,6},$$

где r — радиус выреза в пластинах статора,

Логарифмический закон изменения емкости

Следующим широко применяемым законом изменения емкости является экспоненциальный. Когда в колебательном контуре используется переменный конденсатор с формой пластин, подчиняющейся этому закону, степень расстройки контура, приходящаяся на одно и то же число делений шкалы, будет одинаковой по всей шкале.

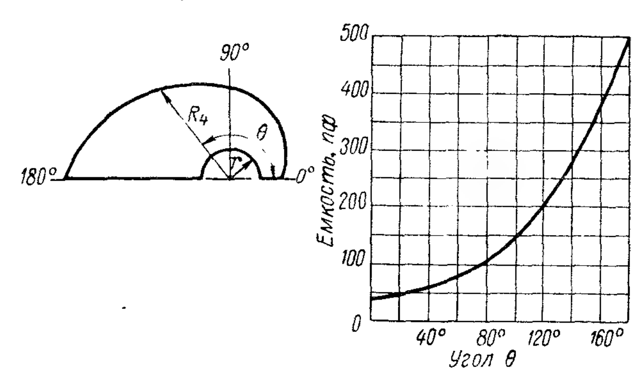


Рис. 15-5. Логарифмический конденсатор.

Форма пластины ротора показана на рис. 15-5.

Емкость конденсатора изменяется с углом поворота так:

$$C_4 = a_4 e^{b_4 \theta}.$$

Площадь перекрытия пластин

$$S_\theta = k\left(a_4 e^{b_4 \theta} - C_{\text{нач}}\right) + K\theta.$$

Радиус ротора

$$R_4 = \left[114{,}6\left(k a_4 b_4 e^{b_4 \theta} + K\right)\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Постоянные a_4, b_4, k и K имеют следующие значения:

$$a_4 = C_{\text{нач}}, \quad b_4 = \frac{\lg C_{\text{макс}} - \lg C_{\text{нач}}}{78{,}174},$$

$$k = \frac{S_{\text{макс}} - 180K}{C_{\text{макс}} - C_{\text{нач}}}, \quad K = \frac{r^2}{114{,}6},$$

где r — радиус выреза в пластине статора.

Таблица 15-1

Влияние последовательного присоединения конденсатора постоянной емкости *С*, *пф*

θ, *град*	Радиус, *см*							
	по линейному закону при		по квадратичному закону при		по обратноквадратичному закону при		по экспоненциальному закону при	
	$C=\infty$	$C=500$	$C=\infty$	$C=500$	$C=\infty$	$C=500$	$C=\infty$	$C=500$
0	3,46	2,74	2,49	2,16	8,25	9,25	1,93	1,82
10	—	2,80	—	—	6,70	6,95	—	—
20	—	—	2,76	2,35	5,62	5,57	2,13	1,96
30	—	2,92	—	—	4,80	4,65	—	—
40	—	—	3,05	2,56	—	—	2,36	2,15
50	—	3,06	—	—	—	—	—	—
60	—	—	3,24	2,78	3,32	3,15	2,64	2,38
70	—	3,22	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—
90	3,46	3,40	—	—	2,56	2,42	3,16	2,85
100	—	—	3,66	3,37	—	—	—	—
110	—	3,66	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	2,10	2,02	3,85	3,57
130	—	3,88	—	—	—	—	—	—
140	—	—	4,03	4,25	—	—	—	—
150	—	4,18	—	—	1,83	1,78	4,71	4,74
160	—		4,20	4,85	—	—	—	—
170	—	4,52	—	—	—	—	—	—
180	3,46	4,73	4,38	5,66	1,65	1,62	5,80	7,16

Примечание. В каждом случае видно, что последовательная емкость *С* уменьшает радиус пластин в начале шкалы конденсатора и увеличивает его в конце шкалы; иными словами, наличие последовательной емкости делает форму пластин ротора более резкой, причем ее влияние на форму пластины тем больше, чем она сама меньше.

Если любой из конденсаторов с пластинами рассмотренной специальной формы соединен последовательно или параллельно с другим конденсатором, то закон изменения емкости, конечно, изменится. Гриффитс дал такие уравнения для всех законов емкости для случая последовательного соединения переменного конденсатора и постоянного конденсатора любой емкости. С помощью этих уравнений в качестве примера определено влияние конденсатора емкостью 500 *пф*, присоединенного последовательно к переменному конденсатору со следующими параметрами: максимальная емкость 500 *пф*, минимальная емкость 36 *пф*,

общая площадь пластины 20 $см^2$, радиус выреза в пластинах статора для прохода оси ротора 1,2 *см*. В табл. 15-1 сравниваются значения радиусов пластин ротора при четырех законах изменения емкости для случая бесконечно большой последовательно включенной емкости (т. е. без последовательного подключения добавочного конденсатора) и для случая последовательного подключения постоянной емкости 500 *пф*.

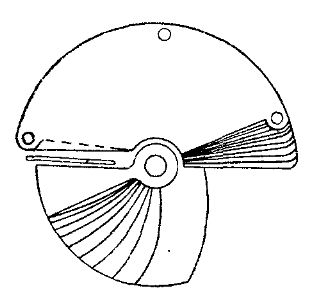


Рис. 15-6. Логарифмический конденсатор с переменной формой пластин ротора при постоянном значении их радиуса.

В 1934 г. Гриффитс разработал конденсатор, емкость которого изменяется в зависимости и от формы, и от числа взаимно перекрывающихся неподвижных и перемещающихся пластин. В результате он получил более компактный конденсатор с заметно улучшенной стабильностью емкости; форма пластин такого конденсатора, обеспечивающая логарифмический закон изменения емкости, показана на рис. 15-6.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ ВОЗДУШНЫХ МНОГОСЕКЦИОННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Форма пластин конденсаторов, емкость которых изменяется по заданному закону, была рассмотрена в гл. 14. В тех случаях, когда используются многосекционные переменные конденсаторы, например в контурах генерирования и настройки супергетеродинного приемника, необходимо подгонять емкости отдельных секций так, чтобы они изменялись согласованно. Небольшое несоответствие выравнивают регулировкой крайних пластин, имеющих радиальные прорези. Типичные формы пластин с такими прорезями показаны на рис. 16-1. Обычно строят кривые зависимости изменения емкости и значения $\sqrt{C}$ (при обратноквадратичном законе изменения емкости) от угла поворота оси ро-

тора θ. Для случая, когда общая минимальная емкость контура составляет 60 *пф* (включая начальную емкость конденсатора), типичные кривые будут иметь вид, показанный на рис. 16-2.

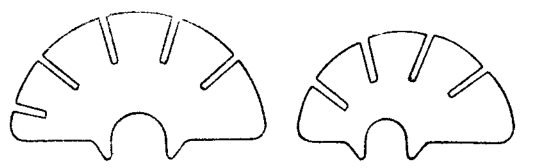


Рис. 16-1. Типичная форма последней пластины ротора в конденсаторах для супергетеродинных приемников.

К конденсатору переменной емкости для широковещательного приемника предъявляют два основных требования:

1) частотная стабильность — для того, чтобы не изменялись положения настройки, соответствующие определенным станциям, указанным на шкале;

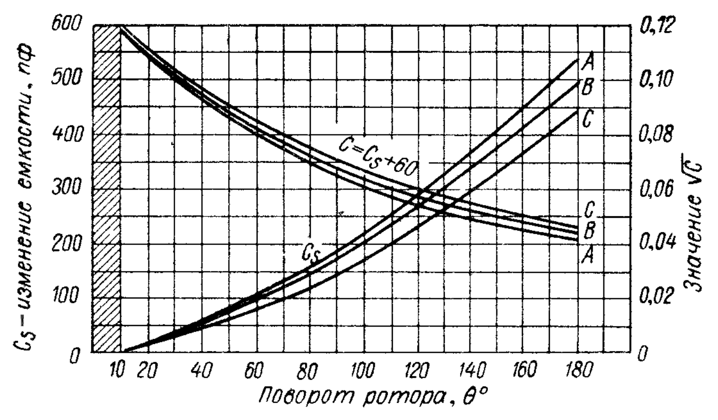


Рис. 16-2. Зависимость изменения емкости от поворота ротора в конденсаторе фирмы «Плесси».

2) жесткое закрепление пластин — для того, чтобы предотвратить микрофонный эффект.

Последнее, в частности, особенно важно при очень высокой частоте и при частотной модуляции. Для обеспечения частотной стабильности не должно быть ни кратко-

временных, ни длительных изменений зазоров между пластинами или размеров рамы. Это достигается снятием всех внутренних напряжений с пластин перед сборкой и жесткостью механической конструкции рамы.

Кроме того, в генераторной секции многосекционного конденсатора иногда применяют удвоенный зазор. Для предотвращения микрофонного эффекта не должно быть механического резонанса в звуковом диапазоне частот. В случае частотной модуляции и при очень высокой частоте или пластины делают толще, чем при обычных частотах широковещания, или увеличивают расстояние между ними, причем обязательно обеспечивают жесткость конструкции рамы.

Конструкция рамы

Применяют рамы четырех видов для конденсаторов рассматриваемого типа: сборные, гнутые, гнутые со стяжками, литые рамы.

1. Конденсатор со сборной рамой. Преимущество этого типа конструкции — в легкости увеличения числа секций, а также в удобстве замены отдельных секций, в применении специальных секций для расширения диапазона и т. д. На рис. 16-3 показан общий вид конденсатора этого типа.

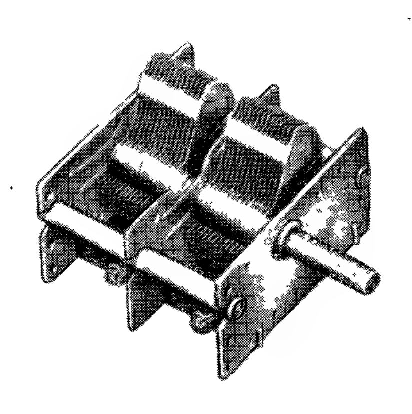


Рис. 16-3. Переменный конденсатор со сборной рамой фирмы «Рэдио конденсер».

Передние и задние пластины связаны с помощью жестких соединительных брусков, которые могут быть выточены в виде цилиндров или отштампованы в виде плоских стержней. Иногда бруски изготовляют из керамики и используют для изоляции пластин статора.

Присущая этой конструкции жесткость обеспечивает удовлетворительную частотную стабильность и отсутствие микрофонного эффекта. Однако размеры этой конструкции велики, а стóит она дороже гнутой рамы.

2. Конденсатор с гнутой рамой. Конденсатор переменной емкости с гнутой рамой разработан как изделие с пониженной стоимостью. В данном случае рама изготовлена гнутьем на прессе из одного куска металла, причем обе боковые пластины (щеки) представляют одно целое с основной пластиной, несущей статор. Конденсатор этого типа показан на рис. 16-4.

Для снятия напряжений в гнутых участках рамы обычно требуется отжиг, но даже после этого такая рама значительно менее устойчива, чем рама сборного типа, в которой любые напряжения, вызванные нагрузкой на подшипники, поглощаются ее упругостью.

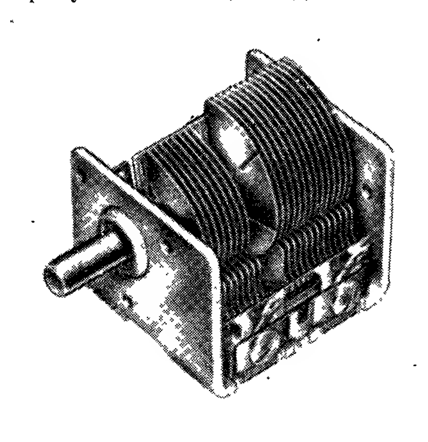


Рис. 16-4. Переменный конденсатор с изогнутой рамой фирмы «Рэдио конденсер».

3. Конденсатор с гнутой рамой со стяжками. Гнутая рама, изготовленная из одного куска металла, может быть снабжена стягивающими брусками, но так как в ней возможны значительные внутренние напряжения, то она мало используется. Для конденсаторов больших размеров, вероятно более экономично применять раму сборного типа, которая обеспечивает бóльшую гибкость в сборке. Там же, где требуется миниатюрный конденсатор жесткой конструкции, гнутая рама со стяжками получает теперь большое признание.

4. Конденсатор с литой рамой. Можно изготовить основание любым из хорошо известных методов литья под давлением. На первый взгляд кажется, что литой тип рамы имеет много преимуществ, например, в отношении жесткости, однако наряду с этим такой вид конструкции отличается четырьмя основными недостатками:

1) металлы, применяемые для литья под давлением, обычно неудобны для крепления в них подшипников оси ротора;

2) для получения необходимой прочности стенки рамы должны быть толще, чем у гнутой стальной рамы

что значительно увеличивает расход материала и ее вес;

3) применение простой коробочной формы рамы недопустимо, так как она затрудняет доступ к пластинам статора и ротора для их осмотра и подгонки; поэтому на всех стенках рамы надо иметь окна, что весьма усложняет литьевую форму;

4) для каждого размера рамы необходима отдельная литьевая форма.

Учитывая эти недостатки, большинство изготовителей предпочитает использовать рамы сборного или гнутого типа.

Конструкция ротора и статора

Пластины конденсаторов радиовещательного типа штампуют главным образом из алюминиевых полос. Полосу прокатывают с очень большой точностью по толщине, чтобы получить после сборки требуемый допуск по емкости. После штамповки желательно проводить отжиг пластин, принимая меры к сохранению их плоской формы. Статорные пластины обычно вставляют в прорези, сделанные в стойках статора. Для фиксации точного положения пластин производят расчеканку в том месте, где выступающие края пластин проходят через стойки. Пластины ротора изготовляют подобным же образом и собирают на оси, также имеющей прорези. Пластины могут быть закреплены с помощью расчеканки или же жестко запрессованы в эти прорези. В последнем случае дальнейшей операции для их закрепления не требуется. У одного края пластин ротора устанавливают перпендикулярно к их плоскости стопорную прорезную колодку, которая фиксирует точное значение зазоров между пластинами и служит в качестве стопора, ограничивающего пределы поворота ротора. Очень важно, чтобы гладкость и равномерность толщины материала пластин в конце процесса были возможно более совершенными.

Большая точность проточки прорезей и пазов в оси ротора, в стойках статора и в стопорной колодке также исключительно важна для обеспечения высокой надежности и воспроизводимости работы конденсатора.

Конструкция оси и подшипников

Ось обычно изготовляют из латуни и прорезают на ней пазы для установки пластин. На переднем конце оси протачивают кольцевой вырез размещения шариков в подшип-

нике, образованном вырезом в оси и соответствующим ему пазом в передней плате рамы конденсатора. При выдавливании паза создается наклеп в материале, что обеспечивает достаточную стойкость против износа. Задний конец оси обычно опирается на подпятник, образованный шариком, который помещен в углубление на торце оси и вращается в подобном же углублении втулки, заделанной в раму. Для получения требуемого рабочего вращающего момента подпятник должен допускать регулировку или с помощью винта с тормозной гайкой, или перемещением втулки по отношению к раме за счет ее выпрессовывания. Если требуется меньший момент вращения, то подпятник можно заменить кольцевым шариковым подшипником с пирамидальным расположением четырех или более шариков. В этом случае можно, не увеличивая размера конденсатора, использовать вращение переднего ряда шариков для получения эпициклического редуктора введением дополнительной оси уменьшенного диаметра с прорезанной в ней канавкой, касающейся внутренней поверхности шариков. Таким путем можно получить снижение скорости поворота ротора в 4—7 раз по отношению к скорости поворота дополнительной оси.

Указатель шкалы обычно приводится в движение веревочной передачей от барабана, укрепленного на оси ротора. Применение редуктора позволяет сократить размеры этого барабана. В эпициклическом редукторе описанного здесь типа неизбежно проскальзывание, которое будет отражаться на градуировке шкалы; этого можно избежать, применяя редуктор с зубчатым зацеплением и пружиной, устраняющей возможность обратного проскальзывания.

Методы сборки

Наиболее распространенный метод сборки основан на установке оси ротора, на которой уже собраны пластины, в раму и регулировке подшипников для получения требуемого рабочего момента вращения. Затем, используя калиброванные щупы и иные приспособления, вставляют статоры, точно располагая их по отношению к секциям ротора. Секцию статора с установленными на ней керамическими изоляторами, несущими металлические колпачки, укрепляют, припаивая эти колпачки к раме. Статор поэтому не фиксируется в заранее определенном положении,

так как приходится добиваться необходимой точности установки по отношению к ранее смонтированной статорной секции. Контактную вилку также устанавливают на этой стадии сборки; ее обычно штампуют из латуни или другого пружинящего материала; зубцы вилки контактируют с поверхностью канавок, проточенных в оси.

В конденсаторах, рассчитанных на работу при очень высоких частотах (например, при частотной модуляции), необходим улучшенный контакт с ротором. В конденсаторе, показанном на рис. 16-3, использованы прижимные контакты из пружинной латуни; контакты имеют У-образную форму и припаяны к крайним пластинам.

Из этого описания видно, что на конструкцию и сборку широковещательного конденсатора переменной емкости обращается большое внимание, что обеспечивает высокую точность и стабильность современных конденсаторов.

Способы монтажа конденсаторов в аппаратуре

Конденсатор переменной емкости можно монтировать с жестким или эластичным креплением. В первом случае конденсатор жестко прикрепляют к шасси с помощью болтовых соединений. Во втором случае для ослабления микрофонного эффекта применяют резиновые упоры или прокладки. Часто используют крепление в трех точках. Важно, чтобы при закреплении не получалось перекоса или искривления рамы конденсатора; в этом отношении полезно применять эластичные резиновые прокладки. Однако при настройке контуров ультравысокой частоты индуктивность на землю должна быть минимальной, и поэтому предпочтительно жесткое крепление к шасси.

ПЕРЕМЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ

Обычными конденсаторами настройки с минимальной емкостью 500 *пф* трудно настроить контур для приема коротковолновых сигналов, если не применить какой-нибудь механический или электрический метод замедления изменения емкости (расширение полосы частот). Механическая система для расширения полосы частот обычно представляет собой систему передачи вращения к ротору с двумя скоро-

стями. Одна ступень передачи непосредственно связана с ротором, а вторая ступень дает механическую связь с ротором через зубчатый редуктор с передаточным числом порядка 100 : 1. Возможность применения большинства механических устройств ограничивается практически присущим им мертвым ходом; поэтому чаще используются электрические методы расширения полосы частот.

Существует несколько способов расширения полосы частот электрическим методом, основанных на принципе

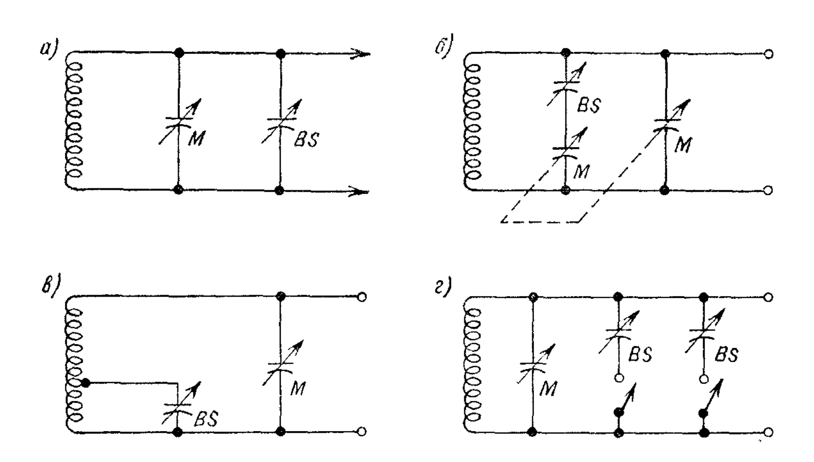


Рис. 16-5. Возможные способы расширения диапазона

M — основной конденсатор настройки; *BS* — конденсатор расширения диапазона.

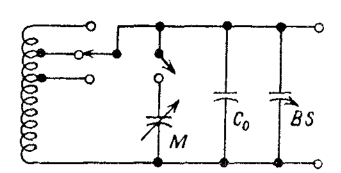
присоединения дополнительного подстроечного конденсатора малой емкости параллельно основному конденсатору настройки. Некоторые возможные варианты показаны на рис. 16-5.

На рис. 16-5, *а* емкость основного конденсатора порядка 500 *пф*, в то время как конденсатор расширения полосы может иметь емкость 10 или 60 *пф*, в зависимости от схемы приемника.

На рис. 16-5, *б* использованы два последовательно соединенных маленьких конденсатора, параллельно присоединенных к основному. Один из дополнительных конденсаторов механически связан с основным, что показано на схеме. При этом относительное расширение полосы настройки

второго дополнительного конденсатора может быть сделано постоянным при полном изменении емкости основного конденсатора. Этим преодолевается недостаток схемы рис. 16-5, *а*, при которой расширение полосы, обеспечиваемое дополнительным конденсатором при максимальной емкости основного конденсатора, будет много меньше, чем в том случае, когда основная емкость мала.

На рис. 16-5, *в* показан метод расширения полосы частот за счет присоединения дополнительного конденсатора к небольшому участку катушки индуктивности колебательного контура.



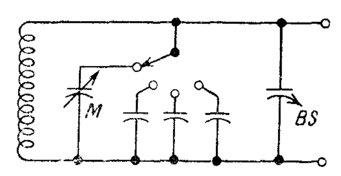


Рис. 16-6. Метод переключения емкостей для расширения диапазона.

Преимущество этого метода заключается в том, что положение точки присоединения можно отрегулировать для каждой катушки так, что для каждого диапазона будет создана постоянная ширина полосы настройки. Недостаток его в том, что в контуре супергетеродина возможно появление интерференции, если не используются дополнительные настроенные контуры.

Рис. 16-5, *г* иллюстрирует еще один метод выравнивания расширения полосы в широком диапазоне частот. Емкость дополнительных конденсаторов может быть 50 или 60 *пф* и 10 или 15 *пф* соответственно. Конденсатор большей емкости включается для получения низкочастотной полосы коротких волн, а меньший конденсатор — для высокочастотной. Необходимо тщательно сконструировать переключающее устройство с тем, чтобы не появилась паразитная емкость.

В обычно применяемом колебательном контуре (рис. 16-6) основной конденсатор настройки *М* отключают, а используют только дополнительный расширительный конденсатор *BS* с подключением маленьких конденсаторов постоянной емкости или индуктивностей для выбора отдельных диапазонов. Можно также ступенчато изменять вели-

чину C_0 для регулирования ширины полосы частот в разных диапазонах.

Тот же результат, только с большей точностью, можно получить при использовании схемы рис. 16-7. В этом случае эффективное изменение емкости расширительного конденсатора составляет от 2 до 70 *пф*, меняясь ступенями с отношением 2 : 1 при использовании переключателя на шесть положений и конденсаторов с указанными на рисунке величинами емкости. В некоторых широковещательных приемниках можно получить компромиссные значения ши-

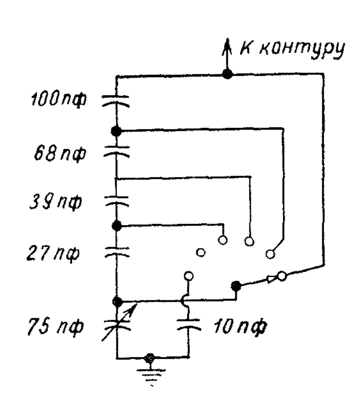


Рис. 16-7. Схема, позволяющая получить шесть изменений эффективного значения емкости для расширения диапазона.

Рис. 16-8. Типичный сдвоенный блок переменных конденсаторов фирмы «Рэдио конденсер».

рины полосы, позволяющие перекрывать более одного коротковолнового канала. Например, каналы с полосой 13 и 16 *м*, 11 и 13 *м* или 41 и 49 *м* можно использовать лишь случайно, а существенное улучшение обычной настройки обеспечить перекрытием двух каналов одной полосой настройки с помощью расширительного конденсатора емкостью 60 *пф*. Чтобы получить расширение полосы настройки на каналах 60, 90 и 120 *м*, необходима дополнительная емкость.

На рис. 16-8 показана новая конструкция секционированного конденсатора для радиоприемников с амплитудной и частотной модуляцией,

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ОБРАЗЦОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

ОДНОСЕКЦИОННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В 1936 г. Томас сформулировал основные требования к конструированию образцовых конденсаторов переменной емкости.

1. Металлические детали конденсатора (статор, ротор, рама) не должны иметь механических напряжений при сборке, что обеспечивается правильным выбором метода крепления, а также остаточных напряжений; при этом температура должна быть одинаковой во всех деталях.

2. Изоляционные детали конденсатора должны обладать:

а) малой величиной температурного коэффициента диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика и давать минимальное значение емкости, вносимой твердым диэлектриком;

б) высокой механической стабильностью;

в) точностью установки изоляторов, поддерживающих статор;

г) малой величиной диэлектрических потерь и высокой диэлектрической прочностью (в случае конденсаторов для радиопередатчиков).

3. Общие температурные требования, предъявляемые ко всем деталям:

а) значение величины произведения из массы на количество тепла, рассеиваемого единицей поверхности, должно быть одинаковым для каждой части конденсатора;

б) величины коэффициента теплоотдачи должны быть тоже одинаковыми для каждой части конденсатора.

В прецизионных конденсаторах современных типов уделяется большое внимание снижению индуктивности для расширения верхнего предела интервала частот.

Типичные данные для прямолинейного воздушно-кварцевого конденсатора переменной емкости, разработанного фирмой «Сюлливан» в Англии, приведены в табл. 17-1.

Перед калибровкой конденсаторы подвергают искусственному старению для обеспечения постоянства калибровки; в качестве твердого диэлектрика для крепления пластин используют плавленый кварц. Потери в таких

Таблица 17-1

Характеристики прецизионных переменных конденсаторов

Изменение емкости, *пф*	Примерные пределы емкости, *пф*	Стабильность емкости на протяжении нескольких лет, *пф*		Точность отсчета, *пф*
		при $C_{мин}$	при $C_{макс}$	
100	35—155	0,01	0,05	± 0,005
1500	90—1600	0,03	0,10	± 0,050

конденсаторах пренебрежимо малы для всех используемых частот. Практически потери конденсатора добавляются к потерям катушки индуктивности, вместе с которой он образует настроенный контур. Потери катушки индуктивности обычно выражают в виде активного сопротивления (при какой-либо заданной частоте). Гриффитс вывел формулу для активного сопротивления воздушного конденсатора:

$$R = R_S + \frac{\alpha}{\omega C^2} + \frac{1}{\beta\omega^2 C^2},$$

где R_S — сопротивление пластин конденсатора;

$\frac{\alpha}{\omega C^2}$ — величина сопротивления, эквивалентного потерям в кварце (α — постоянная, пропорциональная коэффициенту потерь этого материала);

$\frac{1}{\beta\omega^2 C^2}$ — последовательное сопротивление, эквивалентное потерям в параллельном сопротивлении — сопротивлении изоляции β.

Этот вид потерь может и не зависеть от сопротивления изоляции самого кварца, скорее всего он обусловливается загрязнением поверхности.

Величина активного сопротивления современных конденсаторов переменной емкости с воздушно-кварцевой изоляцией показана на рис. 17-1. Кривые зависимости коэффициента мощности от частоты при четырех типичных значениях установленной емкости приведены на рис. 17-2.

Минимум коэффициента мощности находится в интервале частот от 1 *кгц* до 1 *Мгц*, так как коэффициент мощности воздушно-кварцевого конденсатора определяется главным образом активным последовательным сопротивлением при

высоких частотах и параллельным сопротивлением утечки при низких.

Погрешность отсчета по шкале конденсатора этого типа может быть меньше $5 \cdot 10^{5}$ при использовании простого верньера; соблюдение закона прямолинейности настолько совершенно, что неточность при интерполировании меньше погрешности отсчета по шкале. В случае необходимости можно гарантировать, что величина температурного коэффициента емкости не будет превышать $10 \cdot 10^{6}$ *град*^{1}. Это показывает исключительно высокое качество конденсаторов данного типа.

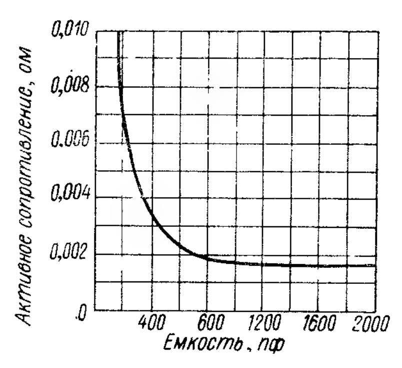


Рис. 17-1. Зависимость эффективного активного сопротивления прецизионного конденсатора (с кварцем в качестве твердого диэлектрика) фирмы «Сюлливан» от величины установленной емкости (частота 1 *Мгц*).

Влияние влажности на прецизионные конденсаторы переменной емкости было исследовано в Англии Фордом; испытания стабильности переменного конденсатора, проведенные Национальной физической лабораторией, показали, что отсчет емкости при относительной влажности, равной 30 и 80%, почти во всех случаях не выходит за пределы отклонения от средней линии градуировки, равного $\pm 3 \cdot 10^{5}$. Таким образом, изменение емкости правильно сконструированного конденсатора переменной емкости в условиях высокой влажности исключительно мало. Конструкция прецизионных конденсаторов переменной емкости, изготовляемых фирмой «Дженерал рэдио», показана на рис. 17-3.

Для изоляции статора от литой алюминиевой рамы используют или стеатит с низкими потерями, или кварц. Рама, разделительные шайбы, стойки статора, ось ротора и пластины изготовляют из одного и того же алюминиевого сплава, так что все части конденсатора должны иметь одинаковый температурный коэффициент линейного расширения. Чтобы обеспечить высокую точность установки заданной емкости, используют червячную передачу. Для устранения эксцентрицитета, который может возникнуть

при насадке червячного колеса на ось, их вытачивают из одного куска металла. Конец червячной передачи, соединенный со шкалой, поддерживается саморегулирующимся

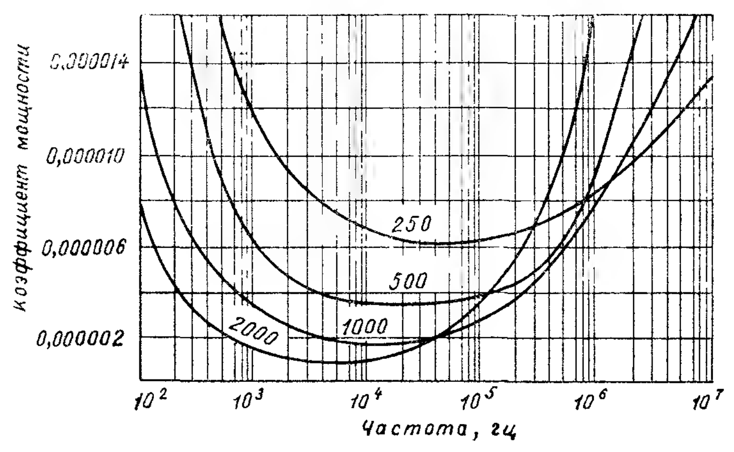


Рис. 17-2. Зависимость коэффициента мощности прецизионного переменного конденсатора фирмы «Сюлливан» от частоты при различных значениях установленной емкости (цифры у кривых — емкость в пикофарадах).

шарикоподшипником, в то время как другой ее конец поддерживается пружинящим устройством. Ось ротора поддерживается с каждого конца герметичным самосмазывающимся легко нагруженным шарикоподшипником.

Таблица 17-2

Интервалы емкостей прецизионных воздушных конденсаторов переменной емкости, выпускаемых фирмой „Дженерал рэдио К°"

Диапазон емкости, *пф*	Точность прямого отсчета емкости		Приблизительная величина емкости при установке шкалы на нуль, *пф*
	пф	%	
100—1150	±1	±0,1	—
25—115	±0,2	±0,1	—
0—1050	±1	±0,1	1140
0—105	±0,2	±0,1	135
0—10,5	±0,05	±0,1	35

Электрическая связь с ротором осуществляется посредством щетки из серебряного сплава, прижатой к контактному посеребренному диску, насаженному на ось.

Мертвый ход не превышает 0,01% максимального отсчета по шкале, но для получения максимальной точности следует постепенно подходить к установлению нужной емкости, поворачивая ротор только в одном направлении.

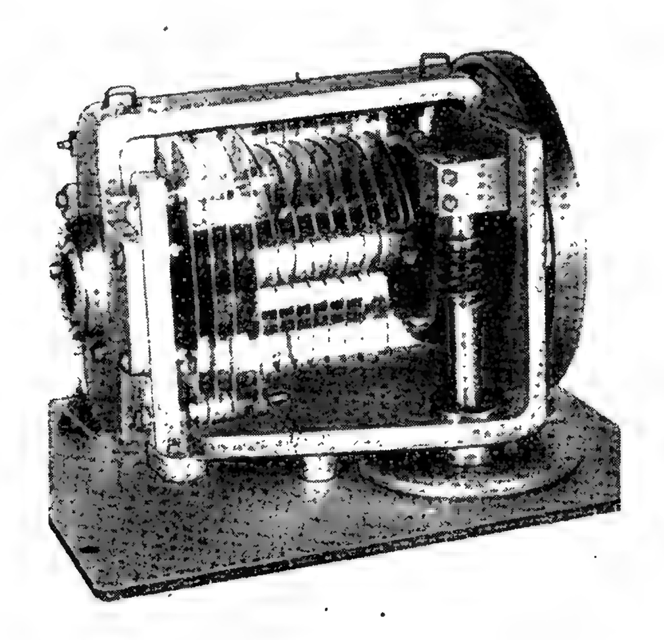


Рис. 17-3. Внутреннее устройство образцового переменного воздушного конденсатора фирмы «Дженерал рэдио».

Интервалы емкостей переменных конденсаторов, выпускаемых фирмой, приведены в табл. 17-2.

Можно изготовлять специальные модели, включая конденсаторы с тремя выводами. В этих конденсаторах применяют ротор с пластинами полукруглой формы, что обеспечивает линейное изменение емкости с углом поворота.

Максимальное рабочее напряжение для конденсаторов всех типов составляет 1000 *в* (амплитудное значение). Диэлектрические потери очень малы, так как для кварца величина произведения D_0C_0 (коэффициент рассеивания ×

× емкость), измеренная при частоте 1 *кгц*, приблизительно равна $0{,}03 \cdot 10^{12}$. Сопротивление изоляции в нормальных условиях (25° С и 50% относительной влажности) больше 10^{12} *ом*. Температурный коэффициент емкости примерно равен $20 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ при изменении температуры в небольших пределах. Мертвый ход меньше половины деления шкалы, что соответствует 0,01% максимального значения емкости. Если всегда устанавливается емкость в направле-

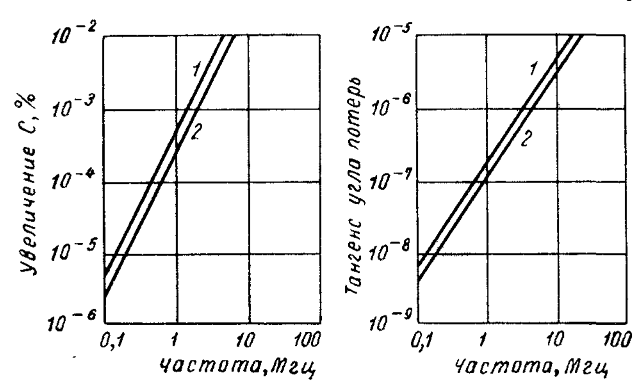


Рис. 17-4. Изменение эффективной емкости и угла потерь с частотой для прецизионного переменного конденсатора фирмы «Дженерал рэдио» типа 722.

1 — секция малой емкости; *2* — секция большой емкости.

нии ее увеличения, то мертвый ход не будет давать погрешности при отсчете. Эффективное значение последовательной индуктивности приблизительно равно 0,06 *мкгн* для всех секций большой емкости и 0,10 *мкгн* для секций малой емкости. Активное сопротивление при частоте 1 *Мгц* равно примерно 0,02 *ом* для секций большой емкости и 0,03 *ом* для секций малой емкости. Последовательное сопротивление изменяется пропорционально корню квадратному из частоты; величина его ничтожно мала при частотах менее 100 *кгц*. Изменение емкости с частотой показано на рис. 17-4.

МНОГОСЕКЦИОННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Современные военные приемники связи требуют применения многосекционных прецизионных конденсаторов, обладающих стабильностью при длительной работе. Такие конденсаторы необходимо изготовлять в больших коли-

чествах, причем они должны быть достаточно малыми по размеру, чтобы их можно было разместить в портативных приемниках связи.

В Англии фирма «Миллард» разработала для использования в военном оборудовании весьма стабильный прецизионный конденсатор, допускающий секционирование. Размеры этого конденсатора относительно малы: длина 67,8 *мм*, диаметр 76 *мм*. Конденсатор собран в цилиндрическом корпусе, что обеспечивает жесткость закрепления подшипников и высокую точность их посадки. Ось поддерживается двумя прецизионными шарикоподшипниками, укрепленными в торцовых стенках корпуса и обеспечивающими минимальное осевое и радиальное смещение оси. Такая конструкция гарантирует точность воспроизведения установленной емкости и необходимое сопротивление изменению емкости, которое могло бы быть вызвано осевым или радиальным смещением оси ротора.

Для уменьшения влияния остаточных напряжений и ухода емкости, вызванного изменением температуры, все детали конденсатора изготовляют из тщательно отожженной латуни, за исключением керамических изоляторов и небольшого числа стальных деталей. Низкую индуктивность при высокой частоте получают путем использования щеточного контакта, установленного в центре оси ротора, и применением коаксиальных выводов. Контактные поверхности покрыты родием. Температурный коэффициент емкости регулируется крайней пластиной ротора, изготовляемой из биметалла. Очень важно монтировать конденсатор на шасси, не прилагая больших усилий; для этого его крепят на жесткой литой раме с помощью концентрических втулок, установленных на торцовых пластинах корпуса. На рис. 17-5 показана конструкция типичного конденсатора. Выпускают четыре варианта таких конденсаторов; изменение их емкости с углом поворота подчиняется прямочастотному закону.

Тип F0. Особенно высокопрецизионный конденсатор с двойным зазором, перекрывающий диапазон емкости от 20 до 340 *пф*; может обеспечить точность отсчета ±0,01%.

Тип F2. Высокопрецизионный двухсекционный конденсатор с пределами емкости каждой секции от 20 до 340 *пф* (точность отсчета ±0,1%).

Тип G. Высокоточный односекционный конденсатор с обычным ротором и расщепленным статором; секция А

имеет интервал емкости от 11 до 112 *пф*, а секция В — от 16 до 226 *пф*; точность отсчета ±0,01%.

Тип Н0 подобен типу F0, но с большей длиной выступающей части оси.

При угле поворота от 15 до 165° конденсаторы типа F0 нормально градуируются точностью ±0,03%, типа F2 — с точностью ±0,25%, типа G — с точностью ±0,1%.

Конденсаторы последних двух типов можно изготовлять со следующей точностью градуировки для каждой секции:

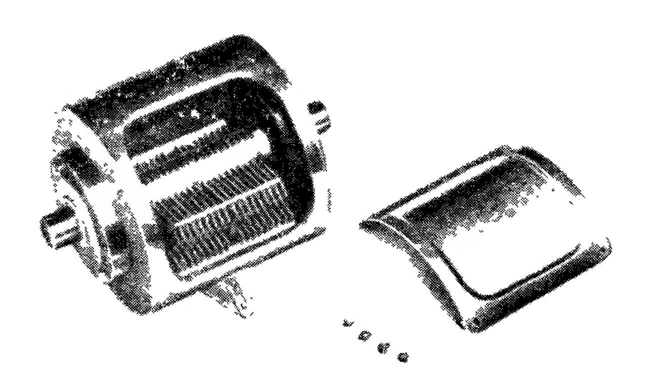


Рис. 17-5. Типичная конструкция переменного конденсатора фирмы «Муллард».

±0,1% и ±0,03%. Форма пластин конденсаторов типов F0 и F2 соответствует прямочастотному закону; максимальная емкость доводится до значения 86 *пф* путем параллельного присоединения добавочной емкости. Обычно эта добавочная емкость образуется паразитными емкостями радиолампы, катушки индуктивности и соединительных проводов; к ним добавляется емкость маленького подстроечного конденсатора, который можно использовать для выравнивания емкости вблизи от минимума. При необходимости можно установить пластины температурной компенсации, обеспечивающие снижение ТКЕ до значения $-15 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$ при минимальной емкости. При использовании конденсаторов в термостатированных устройствах без применения термокомпенсирующих пластин величина ТКЕ составляет $+20 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. На рис. 17-6 приведены величины тем-

пературного коэффициента емкости при наличии температурной компенсации и без нее.

Конденсатор типа F0 обеспечивает соблюдение прямочастотного закона с точностью $\pm 0,1\%$ по емкости при изме-

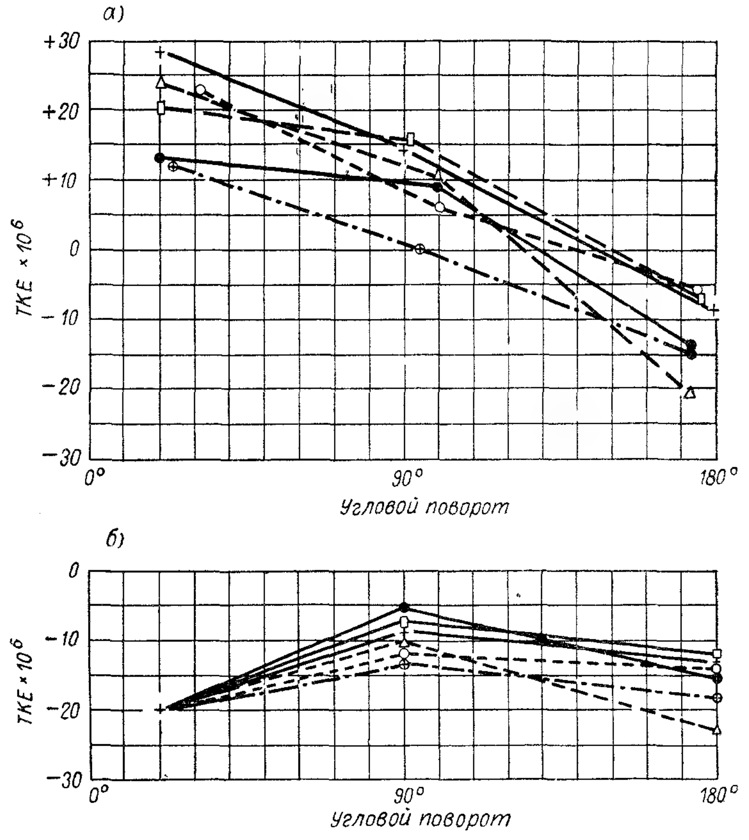


Рис. 17-6. Температурный коэффициент емкости шести конденсаторов типа FO в зависимости от углового поворота: *а* — без компенсирующих пластин; *б* — при наличии компенсирующих пластин.

нении угла поворота от 26 до 176° при условии, что суммарная минимальная емкость (включая триммер, паразитные емкости и минимальную емкость переменного конденсатора) будет равна 86 *пф*.

Конденсатор типа F2 обеспечивает соблюдение прямочастотного закона с точностью $\pm 0,25\%$ (по частоте) также

при условии, что минимальная емкость будет равна 86 *пф*. В табл. 17-3 приведены величины приращения емкости конденсаторов типа Н0 и F0.

Таблица 17-3

Приращения емкости по отношению к начальному значению при разных углах поворота для конденсаторов типов F0 и Н0 с модифицированным законом изменения емкости

Угол, *град*	Емкость, *пф*	Угол, *град*	Емкость, *пф*
0	0	80	59,09
5	0,36	90	71,61
10	2,45	100	85,92
15	5,09	110	102,25
20	7,94	120	121,02
25	10,98	130	142,72
26	11,61	140	168,00
30	14,26	150	197,63
40	21,41	160	232,76
50	29,31	170	275,01
60	38,11	175	299,35
70	47,98	176	304,44

Таблица дает приблизительный закон изменения емкости конденсатора, определенный экспериментально. Эти данные получены при полностью экранированном конденсаторе (крышка корпуса надета). В интервале от 26 до 176° конденсаторы подчиняются прямочастотному закону, обеспечивая перекрытие диапазона частот в отношении 2 : 1. Емкость при 0° равна 19,00 ± 1,00 *пф*.

Конденсатор типа G нормально не рассчитан на спаривание с конденсаторами типов F0 и F2. Однако, поскольку форма пластин у них подобна, можно получить прямочастотный закон изменения емкости конденсатора, как и у конденсатора типа F0, при параллельном подключении емкости.

Стабильность конденсатора F0 при длительном испытании показана на рис. 17-7. Наблюдаемое изменение емкости, по-видимому, обусловлено изменением относительной влажности воздуха, поэтому если требуется максимально возможное постоянство емкости, то оборудование должно находиться в атмосфере с контролируемой влажностью. Также необходимо, чтобы ротор находился под тем же самым

напряжением радиочастоты, что и корпус. В конденсаторе типа F0 ротор не изолируется от корпуса.

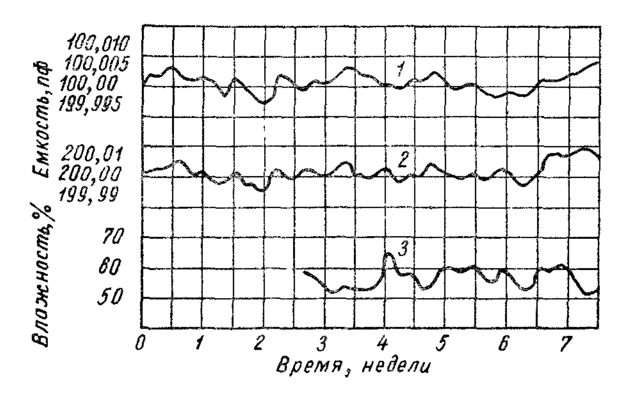


Рис. 17-7. Длительная стабильность емкости конденсатора типа FO.

1 — емкость, измеренная при установке на 100 *пф*; *2* — емкость, измеренная при установке на 200 *пф*; *3* — влажность, измеренная при температуре 20—21° С.

При спаривании осей в секциях из таких конденсаторов следует применять гибкое соединение; для устранения

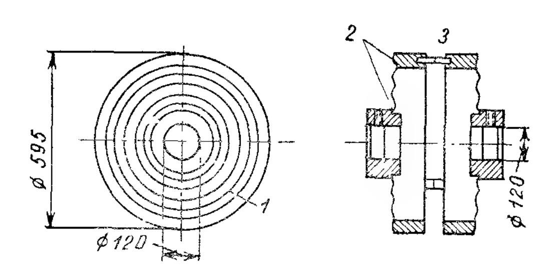


Рис. 17-8. Гибкий соединитель для прецизионного переменного конденсатора.

1 — гофрированная мембрана из бронзы толщиной 0,25 *мм*; *2* — места пайки; *3* — штифты, запаянные после установки.

механического проскальзывания сконструирована специальная муфта, показанная на рис. 17-8.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Конденсаторы данного типа обычно специально конструируются для отдельных радиопередающих устройств, особенно при большой их мощности; тем не менее можно найти некоторые, представляющие интерес, общие принципы конструирования таких конденсаторов. В основном работа конденсаторов для радиопередатчиков подобна работе маленьких конденсаторов в радиоприемных устройствах. Различие заключается в том, что в радиопередатчике конденсаторы должны работать при высоких напряжениях, большой мощности и высоких частотах. В радиопередатчиках напряжение, подаваемое на конденсатор, может быть постоянным, постоянным с наложенной на него переменной составляющей высокой частоты, переменным низкой или высокой частоты, синусоидальным или модулированным. Интервал частот может меняться от нескольких десятков герц до 100 *Мгц* или выше, когда уже требуется конденсатор специальной конструкции. Мощность в колебательном контуре может быть малой, как, например, в маленьком любительском передатчике, но может также доходить и до нескольких сотен киловатт в случае больших радиопередающих устройств.

Основной проблемой является устранение разряда между пластинами, требующее увеличения зазора между ними, что затрудняет получение небольших размеров конденсатора. При высоких частотах приходится также уделять внимание потерям, обусловленным твердой изоляцией между ротором и статором. При радиочастотах в результате потерь в твердом диэлектрике возможен заметный нагрев конденсатора.

Существуют четыре основных типа конденсаторов для радиопередатчиков: воздушные, маслонаполненные, газонаполненные, вакуумные.

ВОЗДУШНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Стандартные конденсаторы для радиопередатчиков, обеспечивающие работу при напряжениях до 3000 *в* в условиях нормальной температуры и давления, изготовляет большинство поставщиков, выпускающих конденсаторы перемен-

ной емкости. По конструкции они обычно подобны конденсаторам для радиоприемников, но их алюминиевые или бронзовые пластины разделены большим зазором и имеют закругленные и полированные края. Между неподвижными и движущимися системами пластин применена изоляция из керамики. Изготовляются прямоволновые конденсаторы емкостью до 500 *пф* и прямоемкостные с емкостью до 1000 *пф*. Конструкция типичного конденсатора для радиопередатчика показана на рис. 18-1.

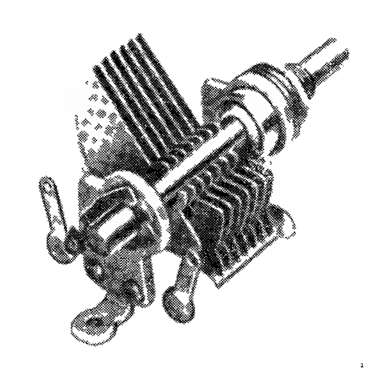


Рис. 18-1. Типичный конденсатор для радиопередатчика фирмы «Хаммарлунд».

Расчет формы очертания пластин для того или иного частного закона изменения емкости с углом поворота был уже дан выше.

Электрические характеристики, получаемые для правильно сконструированных воздушных конденсаторов, предназначенных для передатчиков, приблизительно следующие:

Допуск по емкости	$+10\%$
Точность установки	$0{,}1\%$
Температурный коэффициент емкости . .	$100 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Переходное сопротивление контактов . .	$(5 \div 15) \cdot 10^{-3}$ *ом*
Сопротивление изоляции между статором и ротором, не менее	1000 *Мом*

На рис. 18-2 показана зависимость зазора от напряжения для типичных конденсаторов при частотах до 20 *Мгц*.

Вопрос о пробое воздушного диэлектрика при высоких частотах и высоких напряжениях был предметом многих исследований, результаты которых использованы при конструировании конденсаторов для радиопередатчиков. В большинстве этих исследований применены сферические или игольчатые электроды. Пробой воздуха фактически начинается при первых признаках короны, еще до разряда между электродами. Корона может возникнуть при напряжениях значительно более низких, чем разрядное напряжение; это — результат локальной ионизации воздуха,

который становится проводником при определенном критическом градиенте напряжения. Во всех высоковольтных конденсаторах необходимо избегать присутствия на пла-

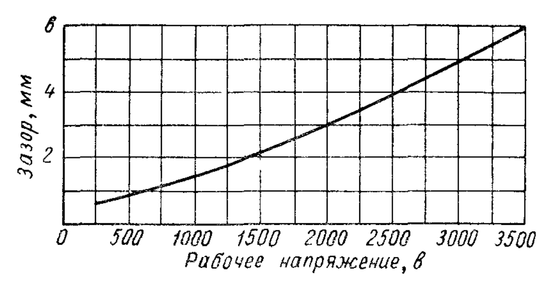


Рис. 18-2. Примерная зависимость между зазором и рабочим напряжением при частотах до 20 *Мгц*.

стинах пыли и частиц волокна, так как они втягиваются в зазор между пластинами силами электрического поля и создают частичные проводящие мостики, которые могут вызвать преждевременный пробой. Пробивное напряжение конденсатора обратно пропорционально частоте и при любом заданном зазоре разрядное напряжение снижается при увеличении частоты.

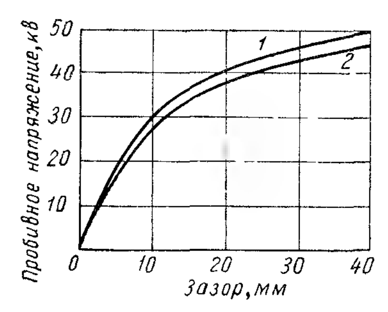


Рис. 18-3. Зависимость пробивного напряжения воздуха от зазора между сферическими электродами диаметром 14 *мм* при частотах, равных 60 *гц* (кривая *1*) и 600 *Мгц* (кривая *2*), по Сюарду.

На рис. 18-3 приведены типичные кривые зависимости величины пробивного напряжения от величины зазора (при использовании сферических разрядников) при двух различных частотах. В 1932 г. Мизере показал, что пробивное напряжение между шарами при частоте 995 *кгц* на 15% меньше, чем при частоте 50 *гц*. В 1939 г. Сюард, используя сферические электроды с диаметром 0,5 и 1,4 *см* (один электрод заземлен), показал, что при частоте 700 *кгц* пробивное напряжение снижается на 6—7% в сравнении с его значением при частоте 50 *гц*.

В 1940 г. Экстранд, применив для получения повторимых результатов облучение ультрафиолетовыми лучами, нашел, что при радиочастотах до 1,8 *Мгц* разрядное напряжение оказывается на 17—20% ниже, чем при 60 *гц*. Путем построения кривых разрядных напряжений, полученных при различной форме электродов, он нашел, что при малых зазорах кривые выравниваются, когда зазор примерно равен удвоенному диаметру электрода. Следовательно, радиочастотные конденсаторы надо конструировать с толстыми пластинами. При хорошо закругленных краях

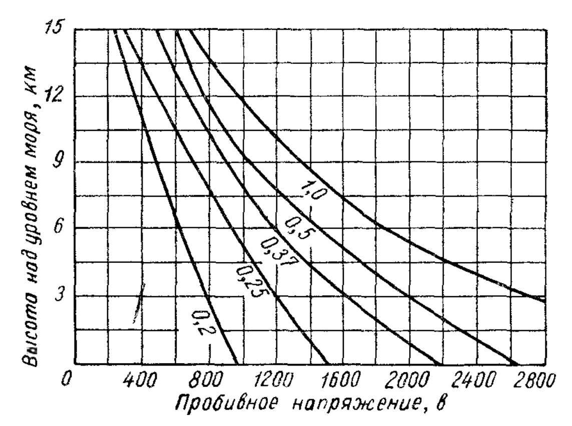


Рис. 18-4. Пробой воздуха при различных высотах и различных зазорах между электродами; цифры у кривых — значения зазоров в миллиметрах.

толщина пластин должна быть от половины до трети величины воздушного зазора конденсатора. Экстранд также провел измерения разрядных напряжений для различных конденсаторов при частотах от 60 до 1500 *кгц*. Он установил, что конденсаторы с толстыми пластинами и малыми зазорами хорошо выдерживают напряжение, в то время как разрядное напряжение конденсатора на номинальное напряжение 20 *кв* с тонкими пластинами и бо́льшим зазором оказалось равным 25 *кв* при 60 *гц*, 14,28 *кв* при 700 *кгц* и 11,7 *кв* при 1,57 *Мгц*.

В случае конденсаторов для передатчиков, используемых в авиаоборудовании, необходимо учитывать снижение пробивного напряжения, которое происходит при больших высотах над уровнем моря. Это требует дополнительного

увеличения зазора между пластинами. В данном случае при возможности следует использовать вакуумные конденсаторы переменной емкости.

Приблизительные величины пробивного напряжения на различной высоте над уровнем моря для различ-

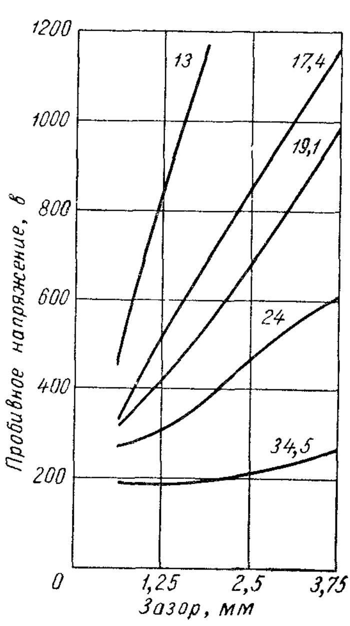


Рис. 18-5. Зависимость пробивного напряжения воздуха при частоте 226,8 *Мгц* от величины зазора при различных высотах над уровнем моря; цифры у кривых — высота в километрах.

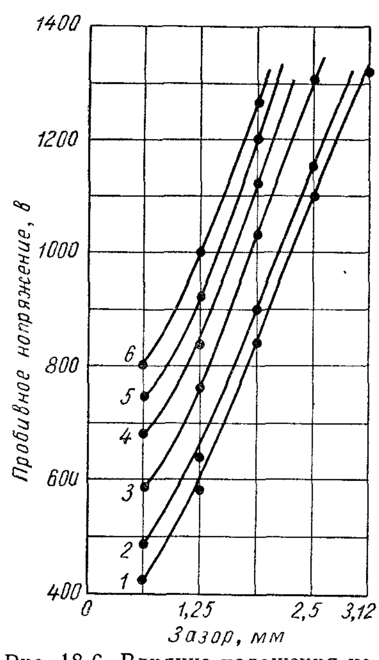


Рис. 18-6. Влияние наложения небольшого постоянного напряжения на зависимость пробивного напряжения воздуха при частоте 378,5 *Мгц* и давлении 80 *мм рт. ст.* (высота 15,6 *км*) от зазора; значения постоянного напряжения: *1* — 0; *2* — 25 *в*; *3* — 50 *в*; *4* — 75 *в*; *5* — 100 *в*; *6* — 125 *в*.

ных значений зазора между пластинами приведены на рис. 18-4.

В Англии некоторые измерения провел Фоуджер при частотах 227 и 378 *Мгц*, использовав метод передающей линии; результаты измерений при частоте 226,8 *Мгц* и изменении величины зазора от 0,62 до 3,75 *мм* приведены на рис. 18-5.

Варела и другие показали, что пробивное напряжение воздуха, по-видимому, возрастает, если наложить небольшую постоянную составляющую на напряжение высокой частоты. Измерения Фоуджера подтвердили, что для частот 227 и 378 *Мгц* наложение постоянного напряжения 125 *в* увеличивает пробивную напряженность при радиочастоте в 2 раза для зазора в 2 *мм*. Некоторые типичные кривые величин пробивного напряжения, приведенные на рис. 18-6, показывают влияние наложения постоянного поля на результаты испытания при частоте 378,5 *Мгц*.

МАСЛОНАПОЛНЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Величина диэлектрической проницаемости жидкостей колеблется в пределах от 1,5 до 100; для неполярных или слабо полярных жидкостей диэлектрическая проницаемость равна 2—5. Поэтому можно использовать повышенную диэлектрическую проницаемость, а следовательно, увеличить емкость, если заполнить конденсатор для радиопередатчика неполярной жидкостью, например минеральным маслом. Диэлектрическая проницаемость этого масла равна 2,2. Очищенное касторовое масло с диэлектрической проницаемостью 4,7 также пригодно для заливки конденсаторов, причем оно обеспечивает соответствующий выигрыш в емкости. При использовании стандартных дисковых электродов диаметром 25,4 *мм* с зазором 2,5 *мм* пробивное напряжение минерального масла составляет 30—40 *кв* (эффективное значение). Можно также использовать хлорированные углеводородные жидкости с диэлектрической проницаемостью 4,5. Масла для пропитки должны быть тщательно очищены и высушены. Методов очистки и фильтрации масел для удаления из них примесей и загрязнений существует много.

Теплопроводность минерального масла равна 0,0003 *кал/сек·см·град*), поэтому оно обеспечивает хорошую теплоотдачу к стенкам корпуса конденсатора.

Герметизация конденсаторов переменной емкости иногда представляет некоторую трудность; для укрепления оси ротора используются сальники с масляными затворами в сочетании с резиновыми кольцами. Пластины конденсатора помещают в паяный корпус, выводы пропускают через впаянные в крышки керамические изоляторы. Если объем конденсатора велик, надо учитывать температурные коэф-

фициенты расширения, так как увеличение объема масла при подъеме температуры относительно велико. Температурный коэффициент расширения минерального масла составляет $6{,}3 \cdot 10^{3}$ *град*^{1}, поэтому в отдельных случаях должны быть применены сильфоны для компенсации расширения масла.

Кремнийорганические жидкости имеют широкий интервал рабочей температуры и значительно более высокую точку воспламенения, но также и бо́льшую степень расширения. Диэлектрическая проницаемость такой жидкости, например марки D.C.200, составляет 2,83, коэффициент мощности равен 0,002 при частоте 1 *Мгц*, а пробивная напряженность лежит в пределах 10—14 *кв/мм*.

ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Размер конденсаторов переменной емкости при большой номинальной емкости можно уменьшить, используя в качестве диэлектрика сжатый азот, так как при повышенном давлении газы обладают повышенной электрической прочностью. Сжатый воздух теперь не используют из-за его исключительной способности поддерживать окисление. Влияние повышения давления на величину разрядного напряжения представлено на рис. 18-7.

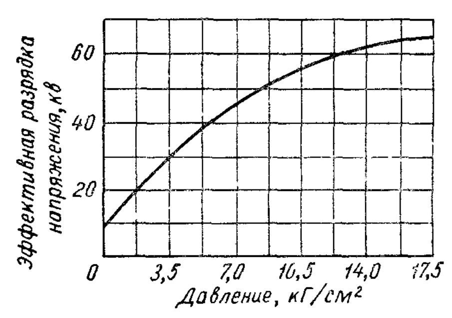


Рис. 18-7. Зависимость разрядного напряжения для типичного конденсатора мощностью 2000 *квар* от давления.

Преимущества конденсаторов со сжатым азотом: безопасность работы, низкие потери и постоянство характеристик. Эти конденсаторы выпускают емкостью до 20 000 *пф* с эффективным значением разрядного напряжения до 60 *кв*. При сжатии азота используют давление до 14 *кГ/см*^{2}.

В качестве диэлектрика используют также стабильный и инертный газ — гексафторид серы SF_6. Его электрическая прочность при давлении 2,1 *кГ/см*^{2} равна электрической прочности азота при давлении 14 *кГ/см*^{2}. В тех случаях,

когда требуется низкая индуктивность, обычно применяют коаксиальные электроды, подобные тем, какие используются в многоэлектродных концентрических триммерах, описанных ниже, хотя, конечно, с бо́льшими размерами. Две системы металлических электродов обычно устанавливают в глазурованный керамический цилиндр, закрытый с торцов колпачками из инвара; внутри корпуса конденсатора создается давление около 2,45 *кГ/см*². Индуктивность конденсаторов переменной емкости этого типа достаточно низка, что позволяет использовать их для шунтирования гармоник в заграждающем фильтре радиопередатчика.

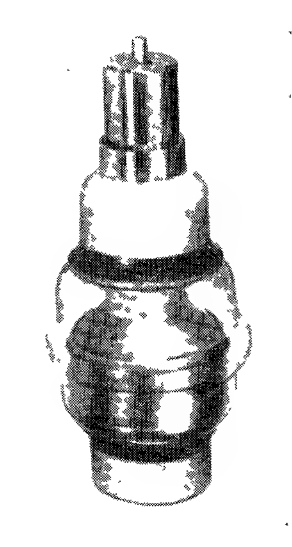


Рис. 18-8. Типичный вакуумный конденсатор переменной емкости фирмы «Дженнингс».

ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Вакуумные конденсаторы переменной емкости по конструкции в основном подобны вакуумным конденсаторам постоянной емкости, но содержат сильфонное устройство для перемещения одной из систем электродов. Их изготовляют с диапазоном емкостей от 12 до 1000 *пф*; используя последовательное и параллельное соединение емкости, можно соответственно удвоить или учетверить рабочие напряжения и допустимые токи. Типичный вакуумный конденсатор переменной емкости показан на рис. 18-8.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ПОДСТРОЕЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ (ТРИММЕРЫ)

ВОЗДУШНЫЕ ПОДСТРОЕЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Различают два случая применения подстроечных конденсаторов: а) для подстройки, при которой конденсатор устанавливают на заданную величину емкости и закрепляют в таком положении; б) для настройки,

при которой необходимо периодическое изменение емкости.

Воздушные полупеременные конденсаторы изготовляют двух основных типов: плоского и цилиндрического. Плоские конденсаторы с подвижными пластинами конструируют также в виде дифференциальных и в виде конденсаторов с расщепленным статором.

Все плоские воздушные подстроечные конденсаторы в основном схожи по конструкции; внешний вид их показан

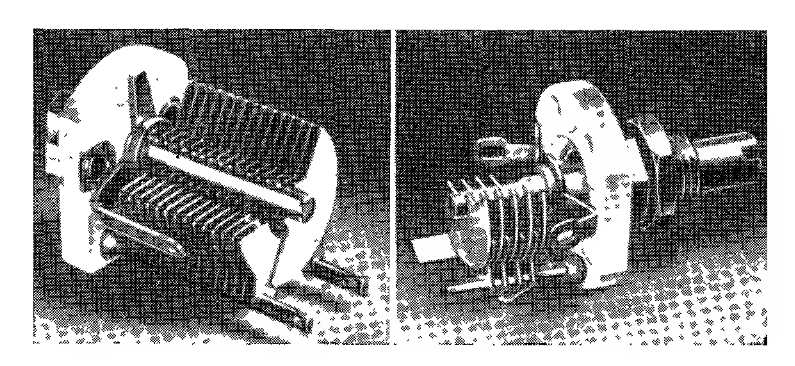


Рис. 19-1. Типичные воздушные подстроечные конденсаторы фирмы «Хаммарлунд».

на рис. 19-1. Они часто имеют стопорное устройство на оси, например разрезной конусообразный подшипник с затяжной гайкой. На оси иногда делают прорез для поворота ротора с помощью отвертки; в других случаях ось остается без прореза и на ее конце укрепляется поворотная головка. Пластины статора обычно крепят с помощью латунных стоек на плате из стеатита, обработанной кремнийорганическими соединениями для гидрофобизации ее поверхности. Иногда подшипник ротора имеет нарезку для крепления в панель. Закон изменения емкости с углом поворота ротора у воздушных подстроечных конденсаторов обычно прямолинейный. Величина зазора между пластинами примерно 0,25 *мм* при низких напряжениях и до 1,27 *мм* при высоких напряжениях. В случае использования конденсаторов при радиочастотах применяют латунные серебрёные пластины. Чтобы получить надежный электрический контакт при высокой частоте, пластины следует припаивать к стойкам статора и оси ротора. Диапазон изменения емкости составляет от

2—3 *пф* для конденсаторов малой емкости до 150 *пф* для конденсаторов больших емкостей.

Допуск по емкости составляет около ±10%. Типичные предельные значения емкости от 3,5 до 10 *пф* для конденсаторов малой емкости и от 9 до 143 *пф* для конденсаторов большой емкости. Основные характеристики имеют следующие значения: рабочий момент вращения от 6 до 18 *кГ · см* при 25° С; величина добротности не ниже 250 при минимальном значении емкости для конденсаторов с керамическими платами; рабочее напряжение от 500 до 600 *в* при величине зазора между пластинами от 0,25 до 0,50 *мм* и 1000—1500 *в* при зазорах 0,76—1,27 *мм*. Сопротивление изоляции при 25° С для конденсаторов с керамическими платами колеблется от 10 000 до 100 000 *Мом* и более, в зависимости от конструкции и использованного материала. Такие конденсаторы предусматриваются спецификацией MIL-C-92 военного ведомства.

Миниатюрные воздушные подстроечные конденсаторы

В настоящее время разработан конденсатор с весьма малыми размерами, рассчитанный на впаивание в печатные схемы при помощи контактных лепестков или для крепления в обычной аппаратуре с помощью винтов. Этот конденсатор показан на рис. 19-2. Пластины ротора и статора изготовлены из серебрёной латуни и припаяны к оси ротора и стойкам статора, контактная пружина ротора — из серебрёной бериллиевой бронзы. Крутящий момент лежит в пределах от 0,110 до 0,450 *кГ · см*. Другие характеристики приведены в табл. 19-1.

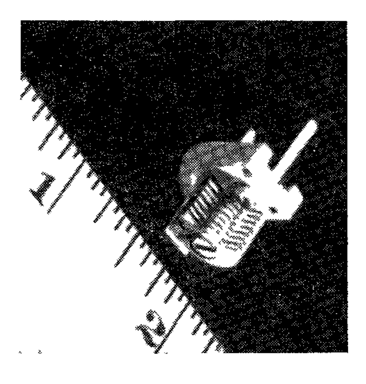


Рис. 19-2. Миниатюрный воздушный подстроечный конденсатор фирмы «Рэдио конденсер».

Сопротивление изоляции между ротором и статором составляет 10^5 *Мом* (измерено при постоянном напряжении 500 *в* и температуре 25° С). Эти конденсаторы разработаны для эксплуатации в усло-

виях воздействия вибрации, механического удара, термического удара, влажности и морской воды, для военных целей.

Таблица 19-1

Характеристики миниатюрного воздушного подстроечного конденсатора

Номинальная минимальная емкость, *пф*	Эффективная максимальная емкость, *пф*	Номинальный зазор, *мм*	Число пластин	Испытательное напряжение, *в*	Температурный коэффициент, *град* [1]
1,2	5	0,35	9	400	$50 \cdot 10^{-6}$
1,2	10	0,20	11	300	$50 \cdot 10^{-6}$
1,5	15	0,20	15	300	$50 \cdot 10^{-6}$

Примечания: 1. Испытательное напряжение (эффективное значение) — при 60 *гц*.

2. Температурный коэффициент показан для интервала температур в 50° С.

Воздушные конденсаторы с расщепленным статором

Подстроечные конденсаторы с расщепленным статором применяют при необходимости точной настройки схемы пуш-пул или симметрично настроенных радиочастотных контуров очень малыми изменениями емкости. Эти конденсаторы конструируют таким образом, что при повороте

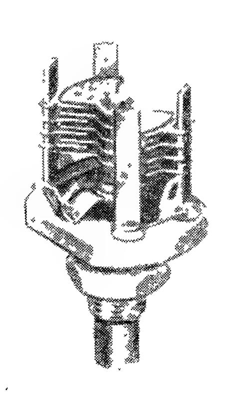


Рис. 19-3. Подстроечный конденсатор с расщепленным статором фирмы «Хаммарлунд (тип «баттерфляй»).

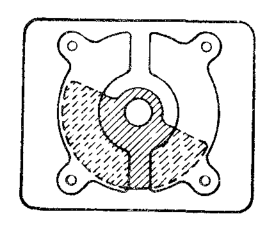


Рис. 19-4. Схема устройства дифференциального подстроечного конденсатора.

ротора емкость каждой системы пластин увеличивается или уменьшается в одинаковой степени. Используют два типа конструкций: 1) две раздельные системы статорных пластин

перекрываются двумя системами пластин ротора, укрепленными на одной и той же оси; 2) используются пластины ротора формы «баттерфляй» («бабочка»), заходящие в зазоры между пластинами двух секций статора. Благодаря компактности конструкции второй тип применяют чаще. Конденсатор этого типа показан на рис. 19-3.

Дифференциальный воздушный подстроечный конденсатор

Эти конденсаторы можно применять в качестве высокочастотных емкостных делителей напряжения, когда точная регулировка должна осуществляться за счет очень малого изменения емкости. При повороте оси ротора емкость у одной системы пластин увеличивается, а у другой снижается. Схема конструкции типичного дифференциального конденсатора показана на рис. 19-4.

Воздушный подстроечный конденсатор для температурной компенсации

Наряду с керамическими термокомпенсирующими конденсаторами, появившимися несколько лет назад в Европе (фирма «Гешо») и работающими на принципе изменения соотношения объема двух разных диэлектриков, вводимых в контур при вращении ротора, в Англии фирмой «Окслей девелопментс К°» создан воздушный термокомпенсирующий триммер. Он предназначается для параллельного включения в колебательный контур с целью стабилизации частоты контура с момента включения установки до момента установления в ней максимальной рабочей температуры. По конструкции этот триммер подобен обычному воздушному подстроечному конденсатору с пятью полукруглыми роторными пластинами, которые могут вращаться в зазорах между четырьмя подковообразными пластинами статора, как показано на рис. 19-5.

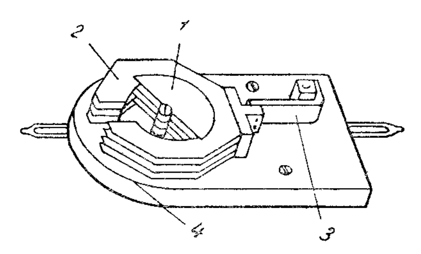


Рис. 19-5. Конструкция температурно-компенсирующего воздушного подстроечного конденсатора.

1 — пластины ротора; *2* — пластины статора; *3* — биметаллическая скоба; *4* — керамическое основание.

Подковообразные пластины монтируют на биметаллической скобе. Скоба смещает их в сторону при изменении. температуры, вызывая изменение емкости, величина которого зависит от первоначальной установки полукруглых пластин ротора. Нормальная емкость приблизительно равна 6,5 *пф* и остается в основном постоянной при данном среднем значении температуры независимо от положения пластин ротора. Температурный коэффициент можно изменять

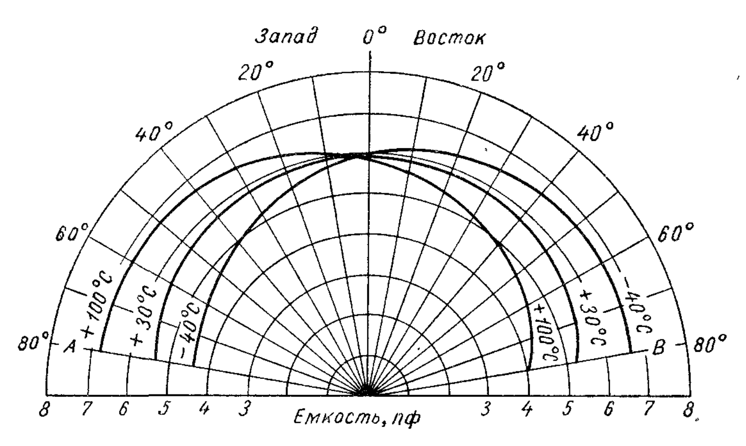


Рис. 19-6. Изменение емкости с температурой для температурно-компенсирующего подстроечного конденсатора фирмы «Оксли»; $C_{макс} = 6$ *пф*;

A . . . . ТКЕ $= 2600 \cdot 10^{-6}$ *град* $^{-1}$

B . . . . ТКЕ $= 3500 \cdot 10^{-6}$ *град* $^{-1}$

Изменение емкости при диапазоне 140° С для *A* составляет 2,1 *пф*, для *B* равно 2,8 *пф*.

в пределах (—2000 ÷ + 2000) · 10^{-6} *град*$^{-1}$, что определяется положением пластин ротора. Таким образом, изменение емкости может достигать 2,5 *пф* по отношению к номиналу, соответствующему 20° С, при изменении температуры в пределах от —40 до +100° С. Характер изменения емкости в этом интервале температур показан на рис. 19-6.

Можно заметить, что при температуре +100° С емкость приблизительно на 1,3 *пф* больше, чем при +30° С, в одном крайнем положении пластин и приблизительно на 1,2 *пф* меньше при другом крайнем положении. При изменении температуры от —40 до +100° С емкость не изменяется,

если пластины ротора повернуты на 4° к западу от нулевой установки.

Когда приходится проводить много измерений, то неудобно выражать полученные результаты как абсолютное

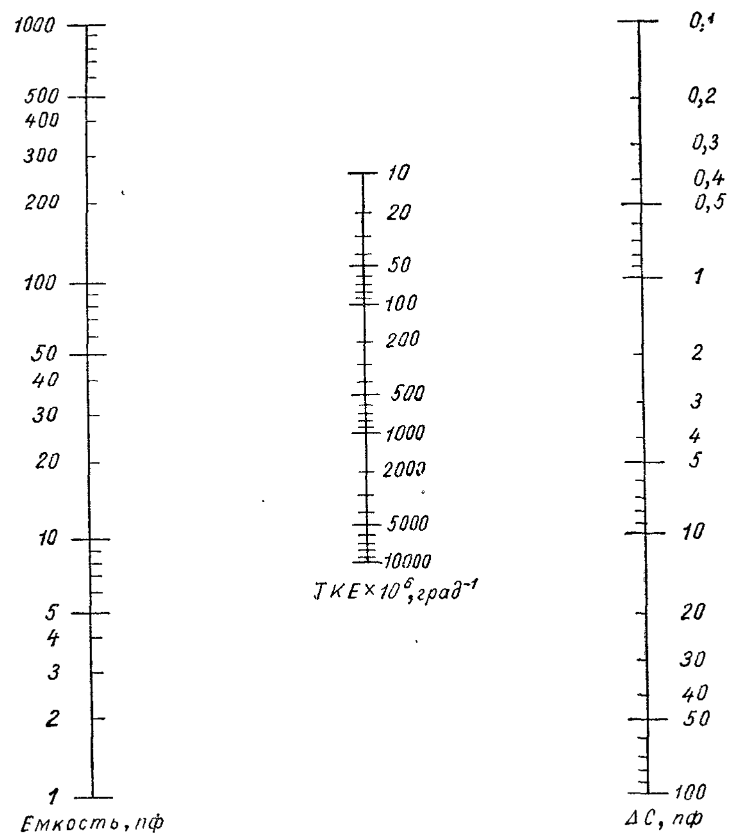


Рис. 19-7. Номограмма, показывающая соотношение между емкостью, величиной ТКЕ и изменением емкости в диапазоне 140° С.

изменение емкости; поэтому «Окслей девелопментс К°» применяет выражение «1 *пф* на 10° С» вместо более обычного «одна миллионная на 1° С». На номограмме, предлагаемой фирмой и приведенной на рис. 19-7, показана зависимость между величиной емкости, температурным коэффициентом емкости и изменением емкости конденсатора при изменении его температуры на 140° С.

Цилиндрический воздушный подстроечный конденсатор

Этот тип подстроечного конденсатора выпускается в Англии.

Конденсатор собирают из двух систем металлических концентрических цилиндров, изготовленных методом выдавливания, причем подвижная система перемещается на керамическом основании. Конденсаторы имеют малые потери и рассчитаны для применения в цепях с высокой добротностью. Малый вес и малые размеры делают их пригодными для использования внутри катушки контура или для подвесного монтажа. Разработаны два типа конденсаторов: один с емкостью от 2 до 8 *пф*, другой с емкостью от 3 до 30 *пф*. Коэффициент мощности при частоте 1 *Мгц* равен 0,007, если измерение проводить при максимальном значении емкости. Рабочее напряжение 75 *в*. Конденсатор совершенно свободен от эффекта вибрации. Фиксацию установленного положения можно обеспечить заливкой. Схематическое изображение конденсатора этого типа приведено на рис. 19-8.

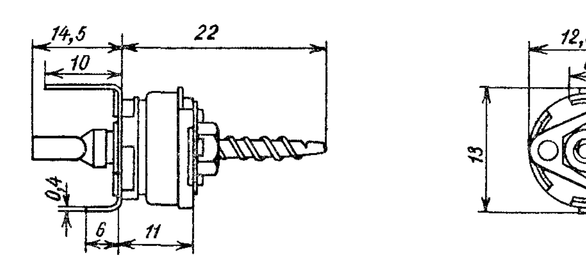


Рис. 19-8. Цилиндрический тип подстроечного конденсатора фирмы «Муллард»; размеры в миллиметрах.

Основное преимущество такого конденсатора заключается в возможности точной установки, так как движение подвижной части определяется вращением винта. К преимуществам концентрической конструкции, помимо ее сопротивляемости вибрации, относится и то, что механические удары весьма мало воздействуют на установленную емкость, если только не появится заметный эксцентрицитет.

Разновидность этой конструкции с фрикционной втулкой из политетрафторэтилена применяется в военной тех-

нике. Трение, создаваемое этим материалом, достаточно для сохранения установленного значения емкости при сильном ударе и вместе с тем обеспечивает возможность исключительно плавной настройки.

ВОЗДУШНО-СЛЮДЯНЫЕ ПОДСТРОЕЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Эти конденсаторы используют преимущественно для подстройки контурных катушек и широко применяют в коммерческой радиотехнике и телевидении, но они не рекомендуются для использования в военном оборудовании. На характеристики конденсаторов этого типа влияют как удары, так и вибрация и воздействие влажности. Конструкция очень проста: одну или несколько пластин слюды помещают между пружинящими пластинками из латуни или луженой фосфористой бронзы, которые сжимают винтовым приспособлением для изменения емкости.

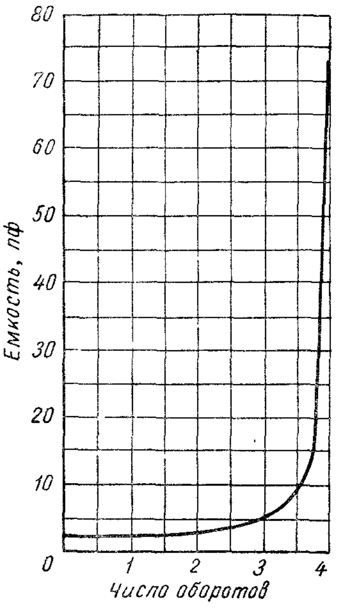


Рис. 19-9. Зависимость емкости однопластинчатого воздушно-слюдяного подстроечного конденсатора от числа оборотов затяжного винта (в сторону увеличения давления).

Различают два типа таких конденсаторов: маленькие двухпластинчатые («почтовая марка») с емкостью $C_{мин} = 7{,}5 \div 50$ *пф* и $C_{макс} = 80 \div 240$ *пф* и сдвоенные многопластинчатые с емкостью $C_{мин} = 15 \div 1400$ *пф* и $C_{макс} = 130 \div 3065$ *пф*.

Маленькие двухпластинчатые конденсаторы (тип «почтовая марка») применяют в наборах катушек для подстройки полосы частот. Шаг установки нажимного винта обеспечивает чувствительность настройки (обычно 2,5 оборота на 1 *пог. см*). Большинство подстроечных конденсаторов этого типа выдерживает приложенное между пластинами постоянное напряжение по-

рядка 500 *в*. Изменение емкости с числом поворотов винта нелинейно. Типичная кривая для конденсатора с одной пластинкой слюды приведена на рис. 19-9.

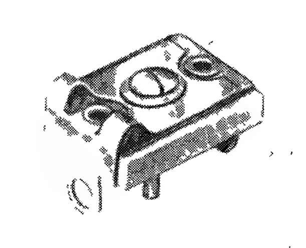


Рис. 19-10. Односекционный воздушно-слюдяной подстроечный конденсатор фирмы «Бэрд».

Приблизительный размер однопластинчатого конденсатора 25,4 × × 12,7 × 12,7 *мм*. Можно изготовлять такие конденсаторы, собирая их в комплекты по шести штук для настройки наборов катушек или для настройки на определенную заданную станцию (кнопочная настройка). Типичная конструкция единичного конденсатора показана на рис. 19-10.

Подстроечные конденсаторы промежуточных частот обычно собирают как сдвоенные конденсаторы на керамическом основании и применяют для согласования первичной и вторичной цепей трансформатора промежуточной частоты. Типичный интервал емкости от 7,5 до 80 *пф* для маленьких конденсаторов и от 1400 до 3065 *пф* для больших.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОДСТРОЕЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Различают два основных вида конструкции: плоский поворотный и цилиндрический; оба они описаны ниже.

Плоский поворотный тип

Керамические подстроечные конденсаторы можно изготовлять с более широким, чем у воздушных триммеров, диапазоном емкостей при сохранении малого температурного коэффициента емкости. При использовании керамики с высокой диэлектрической проницаемостью и подобранным отрицательным температурным коэффициентом они могут служить средством для компенсации положительного температурного коэффициента катушки в настроенном контуре. Основы конструкции конденсаторов с этими двумя разновидностями температурного коэффициента емкости практически одинаковы и показаны на рис. 19-11.

Основание конденсатора обычно изготовляют из стеатита с малой диэлектрической проницаемостью и низкими поте-

рями. Серебрёную полукруглую обкладку статора и вторую холостую обкладку, служащую для уменьшения трения между статором и ротором, наносят на керамику методом вжигания, восстанавливая серебро из пасты при температуре 500—600° С. Вращающийся ротор изготовляют из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью и

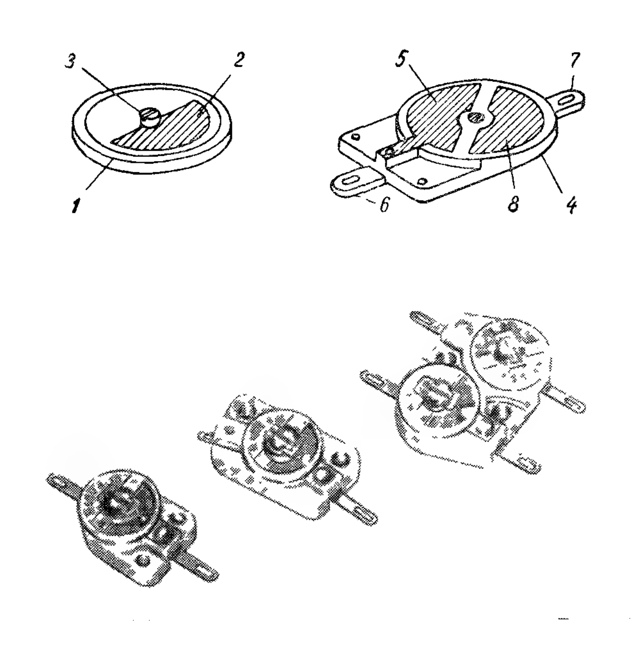


Рис. 19-11. Керамические подстроечные конденсаторы фирмы «Эри резистор».

1 — ротор из керамики с высокой ε; *2* — обкладка ротора (серебро); *3* — винт установки ротора; *4* — стеатит; *5* — обкладка статора; *6* — вывод от статора; *7* — вывод от ротора; *8* — холостая обкладка.

подходящим значением ее температурного коэффициента. Серебрёная обкладка ротора имеет форму полукруга и припаяна к центральной оси. Основание оси ротора приклепывают к упругому металлическому диску, который прижимает ротор к статору, но сохраняет возможность его вращения.

Верхнюю поверхность керамического основания и нижнюю поверхность ротора керамики с высокой диэлектри-

ческой проницаемостью гладко пришлифовывают, чтобы создать наилучшее прилегание и устранить воздушный зазор между статором и ротором. В хорошем конденсаторе пришлифовка должна быть такой, чтобы статор и ротор слипались вместе, подобно магнитам, и не отходили при удалении стягивающих винтов. Даже при такой тщательной пришлифовке между статором и ротором все же остается некоторый зазор, заполненный смесью воздуха со смазкой, имеющей диэлектрическую проницаемость намного ниже, чем керамика. В широком интервале температур это может вызвать некоторую нестабильность емкости за счет изменения эффективного расстояния между твердым диэлектриком и обкладкой. Так как емкость регулируется изменением величины перекрытия обкладок ротора и статора, то изменение емкости на единицу угла поворота постоянно, что обеспечивает выполнение прямолинейного закона. Интервал изменения емкости — от 1,5 до 7 *пф* для наименьших конденсаторов и от 7 до 45 *пф* для наибольших. Конденсаторы этого типа выпускаются в соответствии с военной спецификацией MIL-C-81.

Поршневой (пистонный), или цилиндрический, тип

Другой тип керамического подстроечного конденсатора (аналогичный подстроечным конденсаторам со стеклянным диэлектриком) — цилиндрический, или поршневой, с изменением емкости за счет вращения установочного винта. Емкость цилиндрического конденсатора в идеальном случае может быть найдена по формуле

$$C_{пф} = \frac{\varepsilon l}{4{,}14 \lg \frac{d_1}{d_2}},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость;

l — длина цилиндра;

d_1 — внутренний диаметр внешней обкладки;

d_2 — внешний диаметр внутренней обкладки.

Однако эта формула не учитывает воздушного зазора, неизбежно возникающего в связи с различием производственных допусков на внутренний диаметр отверстия в стекле или керамике и на наружный диаметр внутреннего электрода (поршня). Это значительно снижает

величину емкости и вносит изменения, не поддающиеся контролю.

Маленькие поршневые конденсаторы применяются для уравновешивания паразитной емкости при резонансной и промежуточной частотах. Основной частью подстроечного конденсатора является или длинный металлический винт или поршень, присоединенный к такому винту, что образует электрод, служащий первой обкладкой. Этот электрод перемещается вверх и вниз внутри керамической или стеклянной трубки, поверхность которой посеребрена на половину ее длины, что образует вторую обкладку конденсатора. Цилиндрический конденсатор обеспечивает практически линейное изменение емкости.

Подобные конденсаторы имеют емкость от 1,5 до 3 *пф* для наименьших образцов и от 1,0 до 30 *пф* для наибольших. Стеклянные поршневые подстроечные конденсаторы малой емкости предусматриваются военной спецификацией MIL-C-14409. Типичный конденсатор показан на рис. 19-12.

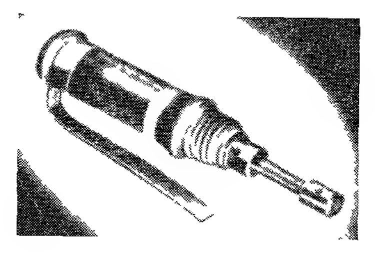


Рис. 19-12. Стеклянный поршневой подстроечный конденсатор фирмы «Корнинг гласс».

В Англии выпускают миниатюрный керамический герметизированный полупеременный конденсатор для военной техники; емкость его может изменяться от 1,5 до 12 *пф*.

Конденсатор состоит из внешнего керамического корпуса диаметром 11,1 *мм*, длиной 12,7 *мм*, внутрь которого вставлена металлическая направляющая втулка, образующая первую обкладку. Керамический диэлектрик имеет вид маленькой трубки, припаянной к концу регулировочного стержня с нарезкой. Маленькая металлическая трубка, в которой перемещаются внутренний стержень и керамический диэлектрик, образует внешнюю обкладку; она припаяна к наружному керамическому корпусу. Связь с этим электродом осуществляется посредством гибкого медного луженого проводника. Внутри конденсатор залит кремнийорганической смазкой. Работа такого конденсатора при неблагоприятных полевых условиях вполне удовлетворительна.

ПОДСТРОЕЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С СИНТЕТИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Подстроечные конденсаторы этого типа обычно имеют цилиндрическую форму. Они состоят из металлического стержня, перемещаемого с помощью винтовой нарезки внутри металлической трубки. Между внутренним стержнем и внешним металлическим цилиндром помещена трубка из синтетического диэлектрика. Чаще всего используют политетрафторэтилен и полиэтилен. Основное применение таких конденсаторов — нейтрализация в усилителях промежуточной частоты, поэтому емкость конденсатора должна быть весьма малой, порядка нескольких пикофарад, при очень низком значении начальной емкости.

В качестве миниатюрного триммера с малой величиной емкости, скажем, порядка 0,5—3,5 *пф*, предпочтительнее использовать цилиндрический вариант, чем пластинчатый или дисковый, так как диаметр цилиндра можно сделать достаточно малым и обеспечить легкое регулирование емкости. Пластинчатый тип допускает поворот только на 180°, в то время как цилиндрический конденсатор с тонкой винтовой нарезкой допускает многократный поворот на 360°. Винтовой дисковый триммер имеет резко увеличенное по сравнению с цилиндрическим начальное изменение емкости.

При использовании таких материалов, как политетрафторэтилен или полиэтилен, стенка трубки должна быть очень тонкой, так как эти материалы имеют относительно низкую диэлектрическую проницаемость. Преимущество материалов с низкой диэлектрической проницаемостью состоит в том, что воздушные зазоры между перемещающимся элементом и трубкой не особенно влияют на общую емкость.

Емкость получается за счет скольжения внешнего трубчатого элемента с помощью винтовой нарезки по неподвижному внутреннему. Эффективная толщина полиэтилена составляет величину порядка 0,25 *мм*, внутренний элемент может быть просверлен для прохода поддерживающего винта от внешней трубки, так что несмотря на малую толщину стенки полиэтилена вся деталь будет иметь достаточную жесткость. Расчетная максимальная емкость (при $\varepsilon = 2,5$) составляет

$$C = \frac{0,28 \cdot 2,54 \cdot 2,5}{4,14 \lg \frac{0,14}{0,12}} = 6,3 \text{ пф}.$$

Между внешней трубкой и полиэтиленом остается небольшой воздушный зазор, а потому эффективная емкость будет несколько меньше расчетной. Измерение при частоте 45 *Мгц* дает значение минимальной емкости 0,41 *пф* при удаленной внешней трубке и 4,0 *пф*, когда внешняя трубка полностью находит на внутреннюю. Коэффициент мощности конденсаторов этого типа составляет около 0,0015. Миниатюрный концентрический триммер подобной конструкции показан на рис. 19-13.

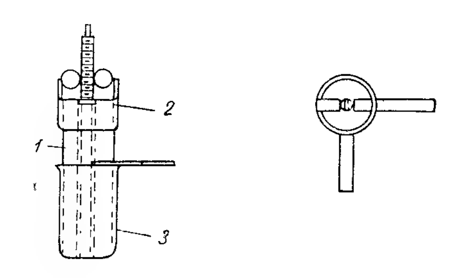


Рис. 19-13. Конструкция подстроечного конденсатора с синтетическим диэлектриком.

1 — диэлектрик (слой полиэтилена); *2* — внутренний электрод; *3* — внешний электрод.

Этот тип конструкции используют преимущественно для конденсаторов малой емкости для печатных схем. Изменение емкости конденсатора осуществляется изменением относительного расположения винта (одной обкладки) по отношению к другой обкладке.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Эти конденсаторы используются при точном измерении интервалов времени в радиолокационных системах. Они также полезны в тех случаях, когда необходим сдвиг фаз при трех- и четырехфазном переменном токе. Конструкция типичного конденсатора показана на рис. 20-1. Трехфазный конденсатор имеет подобную же конструкцию, но на нижней пластине у него три сегмента вместо четырех.

В радиолокационных системах синхронность импульсных колебаний может контролироваться синусоидальной волной, фаза которой изменена сравнительно с временем задержки между переданным и принятым импульсами. Основная синусоидальная волна расщепляется на четыре отдель-

ные фазы, сдвинутые на 90° схемами RC, а затем рекомбинируется в нужных пропорциях в емкостном смесителе с целью получения результирующего сигнала любой требуемой фазы. Из рис. 20-1 видно, что изменение емкости происходит при вращении эксцентрично расположенной круглой пластины из микалекса между верхней одиночной обкладкой

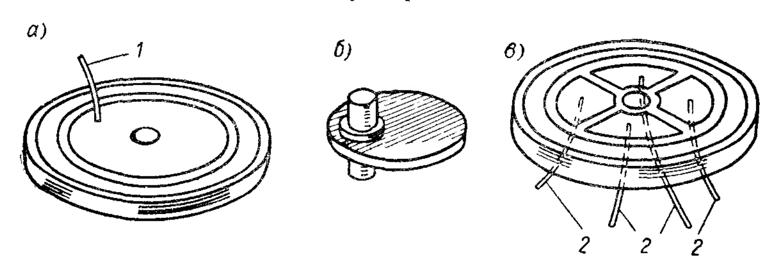


Рис. 20-1. Конструкция типичного фазовращающего конденсатора: *а* — верхняя пластина; *б* — диэлектрический ротор; *в* — нижняя пластина.

1 — вывод; *2* — вводы.

и нижней четырехсегментной. Микалексовый ротор должен быть тщательно пришлифован с обеих сторон, а сборку всей конструкции необходимо выполнять с максимально возможной тщательностью. Правильно собранный конденсатор обеспечивает точность сдвига фазы выходного напряжения в пределах 1% от положения ротора. Диаметр типичных фазовращающих конденсаторов составляет около 50 *мм* при высоте порядка 25 *мм*.

КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЛООБРАЗНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В радиолокационных системах для генерирования пилообразных импульсов напряжения используют потенциометры с вращающимся контактом. Можно использовать и вращающийся емкостный делитель напряжения; он особенно удобен при высоких скоростях развертки. Пластины статора представляют собой к р у г л ы е д и с к и, в которых сделаны прорези, имеющие обычные очертания роторной пластины у воздушных конденсаторов переменной емкости. Сам ротор выполнен в виде продолговатой металлической пластины, вращающейся на длинной оси, как показано на рис. 20-2. При емкости порядка 150 *пф*, как правило,

используют 15—20 неподвижных и вращающихся пластин. Типичная форма пластин такого конденсатора также представлена на рис. 20-2.

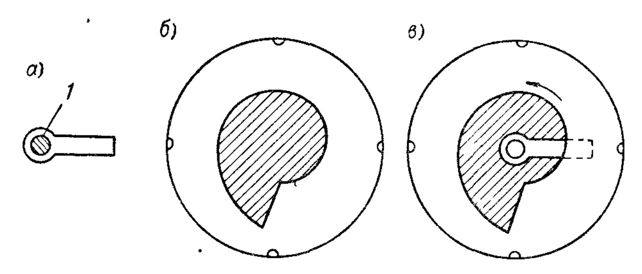


Рис. 20-2. Схема устройства конденсатора для получения пилообразных импульсов: *а* — пластина ротора (*1* — керамическая ось); *б* — пластина статора; *в* — собранный конденсатор.

Полезные сведения как о фазосдвигающих конденсаторах, так и о конденсаторах для генерирования пилообразных импульсов приведены в книге «Справочник по радиодеталям», т. 17, гл. 9, выпущенной Радиационной лабораторией.

Сборка этих конденсаторов также должна проводиться с исключительной точностью. Типичная кривая изменения емкости с углом поворота ротора приведена на рис. 20-3.

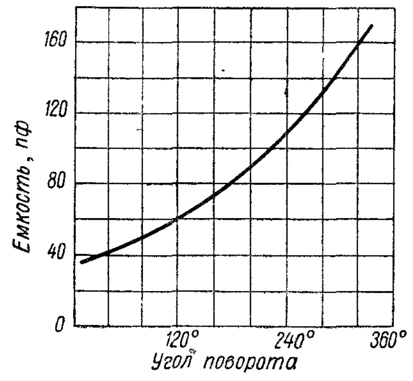


Рис. 20-3. Зависимость емкости от угла поворота ротора для конденсатора, показанного на рис. 20-2.

СИНУСОИДАЛЬНЫЙ КОНДЕНСАТОР

Синусоидальный конденсатор представляет собой конденсатор переменной емкости с двумя полукруглыми статорными пластинами и роторной пластиной специальной формы, обеспечивающей получение синусоидальной, косинусоидальной или другой функциональной зависимости емкости от угла поворота ротора.

Когда к пластинам статора прикладывается стабилизированное входное напряжение, выходное напряжение, снимаемое с ротора, будет пропорционально произведению из входного напряжения на функцию установки конденсатора. Поэтому конденсатор можно применять для решения проблем, включающих две независимые переменные, например для решения прямоугольных треугольников при заданных гипотенузе и одном из острых углов. Схема конструкции прецизионного синусоидального конденсатора, разра-

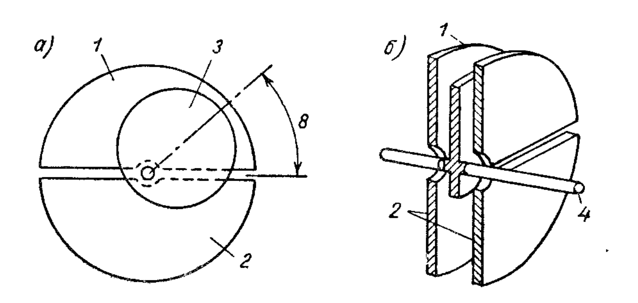


Рис. 20-4. Конструкция «синусного» конденсатора:
а — вид в плане; *б* — вид сбоку, с разрезом.

1 — статор № 1; *2* — статор № 2; *3* — ротор; *4* — ось ротора.

ботанного фирмой «Дженерал физикал лэбораториз», показана на рис. 20-4.

Ротор закреплен на изолированных подшипниках и может поворачиваться на 360°. Обе пластины статора изолированы одна от другой и от ротора; размеры их значительно больше размеров ротора, что ослабляет краевой эффект. Разность между величинами емкостей двух систем (ротор — верхний статор и ротор — нижний статор) может быть сделана пропорциональной синусу угла смещения. Для получения максимальной точности, которую может дать этот тип конденсатора (около 1% или 3—4 дуговые минуты), ротор изготовляют из нержавеющей стали толщиной 2,4 *мм* и шлифуют до получения допуска по толщине ±0,76 *мк*. Статоры изготовляют из стеклянных пластин толщиной 6,3 *мм* и подвергают металлизации, обеспечивая этим их необходимую стабильность.

КОНДЕНСАТОРЫ ТИПА «БАТТЕРФЛЯЙ» И «ПОЛУБАТТЕРФЛЯЙ»

Поскольку конденсатор имеет остаточную индуктивность, а катушка индуктивности — собственную емкость, то обычный резонансный контур, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности, не может быть реализован, если частота превосходит некоторое предельное значение. В качестве такого верхнего предела обычно принимают частоту порядка 100—200 *Мгц*. Возможно, что наибольшую трудность при конструировании обычного контура *LC* представляет правильное размещение выводов этой системы.

При частотах выше 200 *Мгц* нередко применяют схемы типа «баттерфляй» или «полубаттерфляй», представляющие собой устройства, в которых индуктивность и емкость являются интегральными частями колебательных контуров. Выводы располагаются в точках, соответствующих максимуму полного сопротивления при резонансе. Схема типа «полубаттерфляй» показана на рис. 20-5.

Рис. 20-5. Конденсатор с расщепленным статором типа «полубаттерфляй».

Статорные пластины конденсатора поддерживаются полукруглой полосой, создающей индуктивность. Ротор не только образует с пластинами статора воздушный конденсатор, но и действует как экран, блокирующий вихревыми токами часть пространства, в котором создается магнитное поле. Когда ротор полностью введен, емкость имеет максимальное значение, а индуктивность по существу равна индуктивности полукруглой полосы. Когда ротор полностью выведен, емкость снижается до минимума и индуктивность также уменьшается в результате экранирующего эффекта ротора. Таким образом, перемещение ротора изменяет как индуктивность, так и емкость данной системы.

Ротор не требует электрического соединения. Ось ротора можно изготовить из изоляционного материала, в результате чего легко устраняется прохождение токов высокой частоты через подшипники, что желательно для некоторых случаев применения настроенных контуров.

Схематическое изображение контура типа «баттерфляй» и его внешний вид приведены на рис. 20-6. Этот контур можно рассматривать как два параллельно соединенных контура, показанных на рис. 20-5. Ротор в этой конструкции всегда расположен симметрично между выводами *A* и *B*;

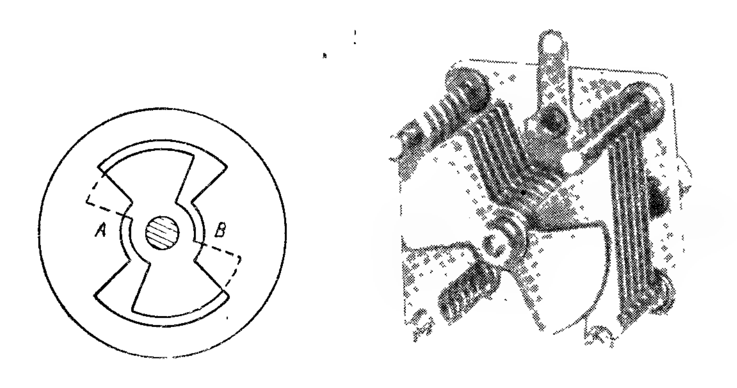


Рис. 20-6. Конденсатор типа «баттерфляй» фирмы «Хаммарлунд».

изменение его емкости относительно земли не влияет на равновесие схемы. Устранение большого выреза между пластинами статора и полукольцевым индуктором, характерное для схемы «полубаттерфляй», позволяет улучшить по сравнению с системой рис. 20-5 механическую стабильность системы рис. 20-6 и сделать ее менее подверженной влиянию колебаний температуры.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЕМКОСТИ

Если неоновый диод поместить между двумя полукруглыми пластинами воздушного конденсатора, то диэлектрическая проницаемость будет изменяться пропорционально току, протекающему через диод, что вызовет изменение емкости между пластинами. Хотя изменение емкости мало, рассматриваемый метод можно применять для контроля частоты самовозбуждающихся генераторов модуляции частоты и для других подобных целей.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ ПРИЕМНИКОВ ТЕХНИКИ СВЯЗИ

В результате все более широкого использования высокой и ультравысокой частоты для связи на короткие и средние расстояния появились сложные блоки конденсаторов, конструкция которых и спецификация на них тесно увязываются с проектированием оборудования в целом. Использование конденсаторных блоков диктуется необходимостью применения в военной технике многоканального оборудования с быстрой настройкой на любой из многих рабочих каналов, лежащих в интервале частот, перекрываемых данным оборудованием. Определенные типы аппаратуры для гражданского применения (например, для авиационной связи и для навигации) тоже нуждаются в таких конденсаторах. В результате теперь применяют приемники связи, допускающие ручную настройку на одни из нескольких сотен каналов без какого-либо дополнительного инструментария. В отдельных случаях предусматривается автоматическая селекция некоторого числа заранее заданных каналов.

В случае применения оборудования при высокой частоте конденсаторы переменной емкости выпускают в соответствии со спецификациями, в которых указаны жесткие требования к закону изменения емкости и к величине температурного коэффициента емкости. Пятисекционный конденсатор рассматриваемого типа показан на рис. 20-7.

Конденсаторы для более ранних типов высокочастотной аппаратуры, в конструкции которых в основном соблюдались те же принципы, иногда собирали из отдельных трех- и четырехсекционных моделей, смонтированных на общей плате с прецизионной зубчатой передачей. Современные образцы более компактны. Обычный диапазон изменения емкости конденсаторов этого типа — порядка 50 *пф*, хотя иногда в сложных передающих устройствах используют секции с различными диапазонами изменения емкости. Различие между емкостями секций порядка 0,5 *пф* и даже менее достигается на протяжении всего интервала настройки. Необходима весьма большая точность, так как перекрывается большое число каналов и требуется высокая надежность работы высокочастотных контуров в радиоаппаратуре.

В некоторых случаях, в диапазоне частот от 100 до 150 *Мгц*, могут быть использованы конденсаторы с роторными пластинами типа «баттерфляй» и конструкции с расщепленным статором. Применение этих конструкций устраняет необходимость подвода тока к ротору, что позволяет свести к минимуму момент вращения. Такой принцип конструирования, в частности, очень удобен для системы авто-

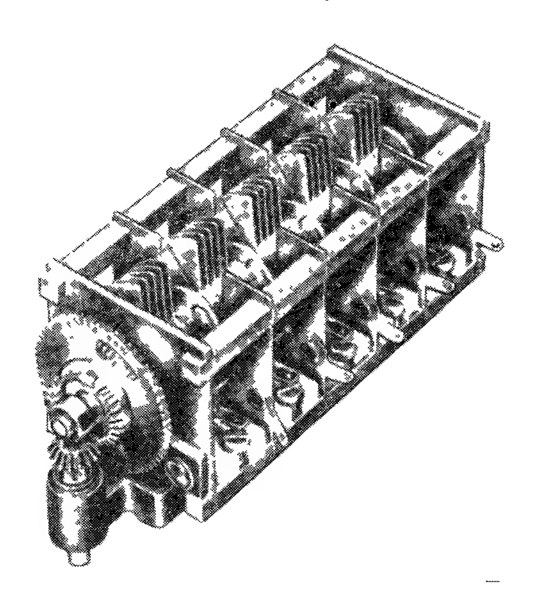


Рис. 20-7. Высокочастотный пятисекционный переменный конденсатор фирмы «Рэдио кондесер».

матического набора с приводом от электромотора. Конденсатор с расщепленным статором может быть использован только там, где допустим ограниченный интервал изменения емкости по отношению к ее общему значению.

Для получения компактной конструкции, когда требуется диапазон изменения емкости порядка 50 *пф*, обычно используют полукруглые пластины. В некоторых случаях применяют керамические оси, чтобы изолировать емкостную связь на землю отдельной секции от всего контура в целом. Кроме того, керамические оси позволяют снизить температурный коэффициент емкости. При использовании

керамических соединительных брусков продольное расширение контролируется только свойствами керамики, которые можно подобрать с расчетом получить очень низкий и постоянный температурный коэффициент линейного расширения. Таким образом предотвращается относительное перемещение пластин ротора и статора и ограничивается изменение величины емкости с температурой. Типичный

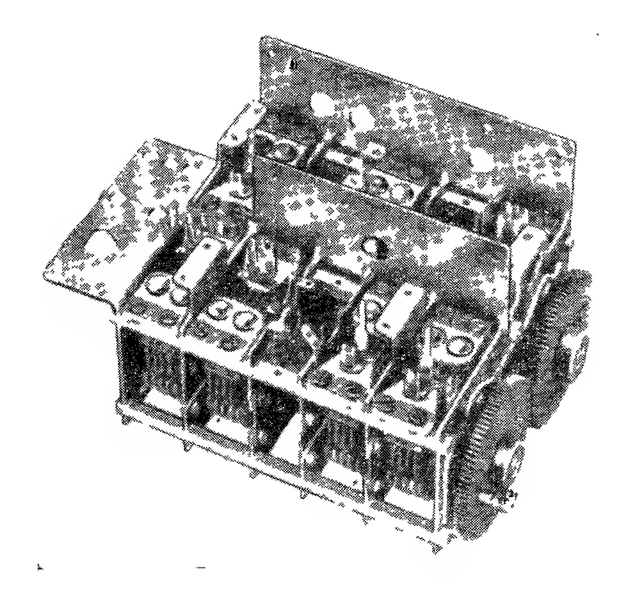


Рис. 20-8. Сдвоенный четырехсекционный конденсатор фирмы «Рэдио конденсер».

четырехсекционный конденсатор для настройки контуров с приводом от зубчатой передачи показан на рис. 20-8.

Контуры многократной настройки для ультракоротковолнового диапазона (например, порядка 300 *Мгц* и выше) имеют свои специальные проблемы. Хотя настроенные линии обеспечивают хорошую работу аппаратуры, но при необходимости использовать многосекционные системы с отдельной настройкой каждой секции значительно увеличивается объем и механически усложняется оборудование. Обычная настройка переменной емкостью уже невозможна, так как последовательная индуктивность пластин становится заметной и не позволяет получить нужное значение

интервала настройки и обеспечить правильную работу контура.

Удовлетворительное решение проблемы получения широкого интервала настройки при частотах порядка 300 *Мгц* показано на рис. 20-9. Трехсекционный конденсатор собирают на жесткой раме, на которой впоследствии монтируют смеситель радиочастот, генераторные лампы и другие необходимые детали. Настройку производят вращением

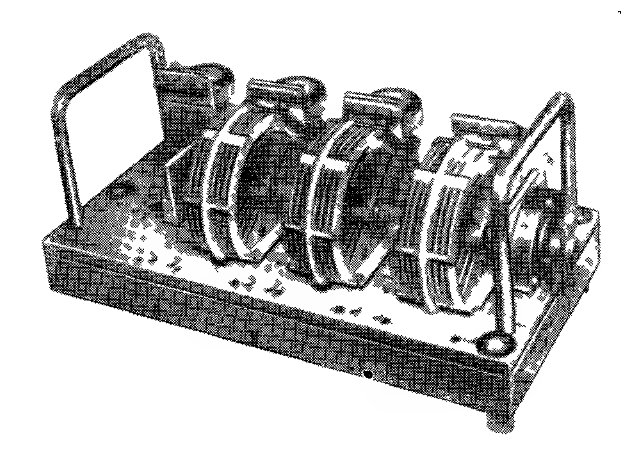


Рис 20 9 Трехсекционный ультравысокочастотный конденсатор типа полубаттерфляй фирмы Плесси

пластин ротора, причем одну часть их углового перемещения используют для уменьшения индуктивности дуговых участков пластин статора, в то время как другая часть перемещения сопровождается включением возрастающей емкости в параллель с индуктивностью дуг статора Этим способом можно получить интервал настройки порядка 2 : 1 по частоте при достаточном постоянстве выходного напряжения и характеристик ширины полосы.

По нескольким приведенным здесь примерам можно составить представление о методах конструирования, используемых теперь для получения компактных приемников в системах радиосвязи. Разнообразие конструкций высокочастотной аппаратуры требует не только согласования электрических параметров конденсатора с аппаратом, куда

он должен быть вмонтирован, но и соответствующего учета механических проблем. Несмотря на это, для новых раз-

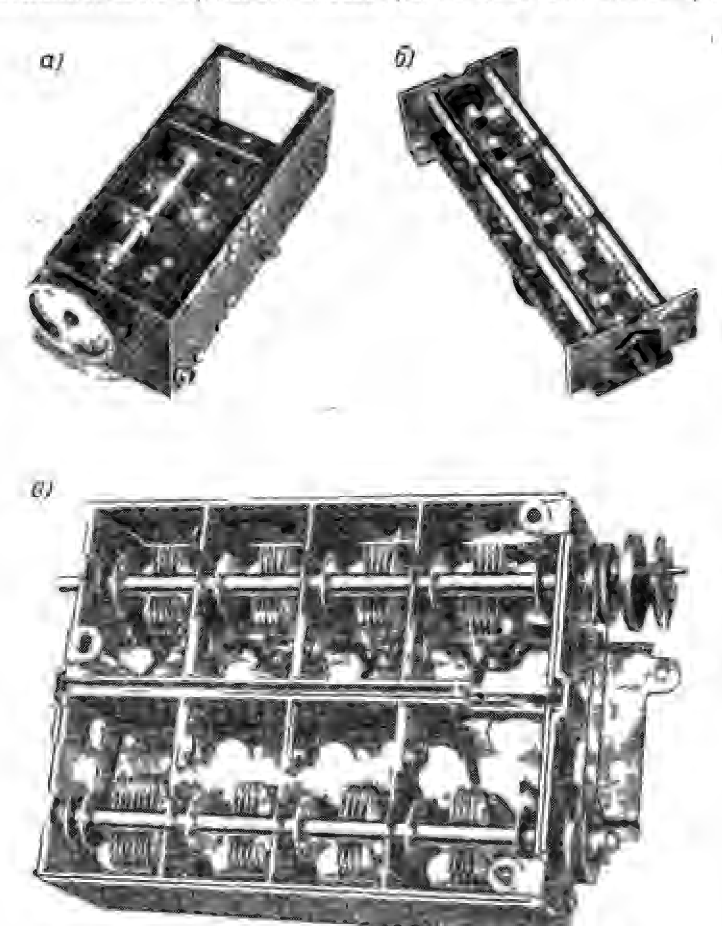


Рис 20-10 Высокочастотные воздушные переменные конденсаторы специального назначения *а* — фирмы «Хаммарлунд», *б*, *в* — фирмы «Рэдио кондеисер»

работок ультракоротковолновой аппаратуры можно предусмотреть использование стандартизованных конструктивных форм с применением обычных деталей, собранных

в блоки с различным числом секций и различными интервалами изменения емкости.

Основные требования к конденсаторам рассматриваемого типа можно свести к следующим: малые размеры, минимальная последовательная индуктивность, точное совпадение закона изменения емкости у отдельных секций, изоляция емкостной утечки на землю для каждой секции, низкий уровень шумов и длительный срок службы контактов ротора, высокая сопротивляемость конструкции воздействию ударов, низкий крутящий момент (при использовании автоматической настройки), широкий интервал рабочих температур. Эти требования весьма серьезны, но конденсаторы, отвечающие им, уже используются в больших количествах в новой военной ультракоротковолновой аппаратуре связи.

На рис. 20-10 показано несколько типов высокочастотных воздушных конденсаторов переменной емкости, которые в настоящее время применяются для специальных целей.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ

ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНДЕНСАТОРАХ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Вообще конденсаторы переменной емкости выходят из строя реже, чем большинство других радиодеталей. Прецизионные типы проектируют и изготовляют с большой тщательностью, используя специально подобранные материалы. Они работают главным образом в таких условиях, которые исключают возможность повреждений из-за воздействия вибраций, высоких температур и влажности. Эти конденсаторы дóроги, и с ними обращаются как с точными приборами. Поэтому повреждения в этом типе радиодеталей происходят редко.

Повреждения конденсаторов общего применения, предназначенных для широковещательных приемников, могут произойти главным образом в результате попадания на пластины чужеродных загрязнений, вызывающих появление треска и шумов с течением времени. Шум может возникнуть и от ухудшения контакта в системе подвода тока к ротору, но этот дефект можно устранить очисткой контактной пружины. В некоторых случаях шум может возникать не вследствие колебаний активного сопротивления, а по при-

чине изменений остаточной индуктивности конденсатора. В нормальных условиях коррозия материалов наблюдается редко, но при работе в полевых условиях возможна коррозия в шарикоподшипниках и других деталях, особенно если детали длительное время находились в условиях высокой влажности.

К повреждениям конденсаторов широкого применения относится микрофонный эффект, который возникает в результате неточной центровки пластин ротора и статора. Этого можно избежать, приняв при изготовлении пластин ряд предосторожностей для получения гладкой поверхности, а также обеспечив аккуратную сборку. Микрофонный эффект может появиться и в конденсаторе, который первоначально был удовлетворительным, если статор сместится из нормального положения или если износ подшипника вызовет последующее смещение ротора. Первую причину дефекта можно устранить, применяя жесткую конструкцию рамы и керамические стойки для статора, вторую причину,— используя шарикоподшипники необходимого размера и правильно регулируя крутящий момент.

Конденсаторы для радиопередатчиков подобны прецизионным типам в том отношении, что условия их изготовления и эксплуатации обычно устраняют возможность появления повреждений. Подстроечные конденсаторы работают в более жестких условиях, в частности в приемниках полевой связи, хотя даже и в этих условиях повреждения случаются относительно редко. Наиболее серьезным повреждением материалов, применяемых при повышенной температуре и влажности, вероятно, является коррозия. В тропических условиях опасно также проникновение влаги в зазоры между керамическими или слюдяными пластинами в плоских типах подстроечных конденсаторов.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Для широковещательных конденсаторов (общего назначения) основным фактором является их стоимость в сочетании с надежной и правильной работой. Будущее развитие должно быть направлено на улучшение методов сборки,

позволяющих снизить цену и более точно выдержать закон изменения емкости с меньшей подстройкой разрезных крайних пластин. Для транзисторной техники разрабатываются конденсаторы уменьшенного размера, в том числе кремниевые конденсаторы переменной емкости («варикапы», или «семикапы», — разновидность кремниевых диодов).

Для применения в военных целях дальнейшее развитие должно быть направлено на создание конденсатора, не подверженного воздействию вибрации и ударов. Это потребует новых принципов конструирования и, возможно, использования амортизирующих агентов, таких, как масло или жир.

У подстроечных конденсаторов, предназначенных для коммерческих целей, следует улучшать стабильность, уменьшать размеры и цену; необходимо добиваться автоматизации процесса монтажа конденсатора на шасси аппарата. Для обычного широковещательного приемника работа конденсаторов достаточно удовлетворительна и технология производства достигла высокой степени производительности.

В воздушных конденсаторах переменной емкости для передатчиков трудно предвидеть главные пути усовершенствования; вероятно, в конденсаторах с жидким наполнением улучшения можно ожидать при введении новых диэлектриков. Вакуумный конденсатор переменной емкости показал свои большие возможности при малых номинальных емкостях; в будущем желательно расширение интервала емкостей наряду с сохранением основных преимуществ этого типа конденсатора.

По подстроечным конденсаторам переменной емкости небольших изменений можно ожидать для воздушных конденсаторов; улучшение слюдяных, керамических и пленочных конденсаторов будет, вероятно, иметь главным образом конструктивный характер. В области герметизированных триммеров для военного оборудования идут значительные экспериментальные работы, направленные на создание новых и улучшенных конструкций. Подвергаются исследованию многие новые диэлектрики: газы, жидкости, синтетические пленки, эмали и оксиды металлов. Возможно, что на основании этих экспериментов будут разработаны совершенно новые типы подстроечных конденсаторов.

БИБЛИОГРАФИЯ ПО КОНДЕНСАТОРАМ

В настоящее время нет общей библиографии по радиодеталям. Публикуемые ниже сведения о литературе по конденсаторам постоянной и переменной емкости собраны с целью создать основное ядро для такой библиографии. Очень мало данных опубликовано по конструкции электронных деталей; такие конструктивные сведения обычно остаются секретом производителей для защиты их коммерческих интересов. В то же время имеется значительное количество литературы по работе электронных деталей в схемах; такие сведения, касающиеся работы конденсаторов, включены в приведенный ниже перечень литературы. Приведены такие ссылки на некоторые общие обзоры по электронным деталям.

Библиография систематизирует литературу по конденсаторам в соответствии с системой изложения материала, принятой в книге; в пределах каждого раздела литература расположена в хронологическом порядке. Сокращения названий периодических изданий (там, где они нужны и используются) приведены в соответствии с перечнем, опубликованным Американским химическим обществом.

Несмотря на то что на данном этапе библиография по конденсаторам не претендует на полноту, можно все же думать, что собранные здесь ссылки на литературу принесут пользу читателю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзоры общего характера по радиодеталям

Ross, I. M.: Component Development for War-time Service Applications, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 94, pt. IIIA, no. 11, p. 231, March—April, 1947.

Reynolds, G. D.: Tests for the Selection of Components for Broadcast Receivers, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 95, pt. III, no. 34, p. 54, March, 1948.

Black, D. H., and N. F. S. Hecht: Electronic Components—Government and Industrial Relations and Co-operation, Commercial, Professional and Service Standards, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 97, pt. III, no. 48, p. 261, July, 1950.

Hall, R. E., and E. Coop: Components for Instruments, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 98, pt. II, no. 66, p. 738, December, 1951.

———: How Component Specifications Can Help the Design Engineer, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 99, pt. III, p. 279, July, 1952.

Darnell, P. S.: Miniaturized Component Design, *Radio and Television News (Radio Electronic Engineering)*, vol. 48, pp. 10—11 and 30, September, 1952.

Dummer, G. W. A.: Components for Transistors, *Wireless World*, vol. 69, no. 5, p. 196, May, 1953.

Halsey, R. J., and F. C. Wright: Submerged Telephone Repeaters for Shallow Water (Life of Components), *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 101, pt. I, no. 130, p. 173, July, 1954.

———: «Techniques for Application of Electronic Component Parts in Military Equipment», McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1957.

2. Выбор конденсаторов и их применение

Halsey, R. J., and F. C. Wright: Coupling Condenser in Audio Amplifiers, *Aerovox Research Worker*, January, 1928.

Smith, B. E.: Proper Condenser Rating Important for Trouble-Free Operation, *Aerovox Research Worker*, April, 1928.

Clark, R. V.: Use of Electrolytic Condensers in Power Supply Devices, *Radio*, vol. N7, p. 176, August, 1929.

———: Factors Which Must Be Considered in Using Filter Condensers, *Aerovox Research Worker*, January, 1931.

Maddison, R. E. W.: Absorption in Electrical Condensers, *J. Franklin Inst.*, vol. 214, p. 327, September, 1932.

Barclay, W. A.: Decoupling Efficiency, *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol. 10, p. 307, June, 1933.
———: Uses of Concentrically-wound Electrolytic Condensers, *Aerovox Research Worker*, March, 1934.
———: Influence of Power Factor and Capacity on Filtering Efficiency, *Aerovox Research Worker,* October-November, 1934.
———: Condenser Leakage and Its Effects, *Aerovox Research Worker,* March, 1935.
———: The Use of Condensers in Radio Receivers, *Aerovox Research Worker*, April—May, 1935.
———: Types of Condensers and Their Applications, *Aerovox Research Worker,* April, 1936.
Thomas, H. A.: Electrical Stability of Condensers, *J. Am. Inst. Elec. Engrs. (JAIEE),* vol. 79, p. 297, September, 1936.
———: Use of Mica Condensers in Transmitters, *Aerovox Research Worker,* October, 1936.
———: Use of Oil Condensers in Amateur Transmitters, *Aerovox Research Worker,* March, 1937.
———: Fixed Condensers in Radio Transmitters, *Aerovox Research Worker,* March, 1941.
Thomas, H. A.: Capacitors in Control Circuits, *Aerovox Research Worker*, August, 1942.
Williams, E.: Calculating Charging Time in R. C. Circuits, *Electronic Ind.*, vol. 1, p. 58, December, 1942.
Schick, W.: Temperature Coefficient of Capacitance, *Wireless Eng.*, vol. 21, pp. 65—71, February, 1944.
Rehfisch, T. J.: Temperature Coefficient of Capacitance, *Wireless Eng.*, vol. 21, pp. 175—176, April, 1944.
———: Capacitor Quality Factor, *Aerovox Research Worker,* July, 1944.
Light, G. S.: Condensers in Series-Heater Circuits, *Electronic Eng. (London),* vol. 17, pp. 454—455, April, 1945.
Cook, H. A.: Temperature-Capacity Coefficient, *Bendix Radio Eng.*, vol. 2, no. 2, October, 1945.
Price, J. F.: Effectiveness of By-Pass Capacitors at U. H. F., *Communications*, vol. 28, pp. 18—19, February, 1948.
———: New Use for Blocking Condensers, *Radio Ekko,* vol. 11, p. 96, May, 1948.
Gough, K. A.: Choosing Capacitors, *Wireless World,* vol. 55, pp. 55—58, June, 1948.
Bailey, J. T.: Coupling Capacitors Can Be Trouble Makers, *Radio-Electronics*, vol. 20, pp. 43, May, 1949.
Gough, K. A.: Choosing Capacitors and Uses of Various Types, *Radio Times,* vol. 4, pp. 10—12, July, 1949.
Сканави Г. И., Нейман М. Д., Стабилизация напряжения с помощью конденсаторов из титаната бария, «Электричество», 1949, № 7, стр. 43—46.
Bennett, A. E., and K. A. Gough: The Influence of Operating Conditions on the Construction of Electrical Capacitors, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 97, pt. III, no. 48, p. 231, July, 1950.
Ritchey, N. B.: U. H. F. By-Pass Capacitor Nomographs, *Radio-Electronic Engineering,* vol. 24, pp. 14, 36—37, March, 1955.
Tucker, R. W., and S. D. Breskend: Effective Leakage Resistance of Several Types of Capacitors, *IRE Trans. on Component Parts,* PGCP-3, April, 1955.

Killen, C. G.: Factors Influencing Capacitor Reliability, *Proceedings of Fifth Annual Conference on Electronic Components,* Los Angeles, May, 1955.
Franklin, W. S.: Paper Capacitor, First Failures and Their Distribution, *Proceedings of the Fifth Annual Conference on Electronic Components,* Los Angeles, May, 1955.
Warner, D. F.: Application of Tantalum Electrolytic Capacitors, *IRE Trans. Component Parts,* PGCP-4, pp. 7—43, November, 1955.
Wyhs, A.: The Complicated Simple Capacitor, *Military Electronics,* pp. 10—12, January, 1959.

3. Измерения электрических свойств конденсаторов и диэлектриков

Gunn, R.: On the Measurement of Very Small Changes of Capacitance, *Phil, Mag.,* vol. 48, pp. 224—226, July, 1924.
Griffiths, W. H. F.: Measurement of Small Variable Capacitors at Radio Frequencies, *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol. 5, p. 452, August, 1928.
Graham, V. M.: Gang Capacitor Testing Device, *Proc. IRE,* vol. 16, p. 1401, October, 1928.
———: How to Test Condenser Capacities, *Aerovox Research Worker,* February—March, 1929.
Braden, R. A., and H. C. Forbes: Condenser Bridge for Factory Inspection of Variable Condensers, *Proc. IRE,* vol. 18, p. 123, January, 1930.
Rayner, E. H.: Low Power-Factor Measurements at High Voltages, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 68, p. 1132, September, 1930.
Wyman, P.: Measurement of the Dielectric Constants of Conducting Media, *Phys. Rev.,* vol. 35, p. 623, March, 1930.
Rohde, L.: Power Factor of Condensers at High Frequencies, *Electrotech. Z.,* vol. 54, p. 580, June, 1930.
Moullin, E. B.: «Theory and Practice of Radio Frequency Measurements», Griffin and Company, London, 1931.
Vassillière, J. L. F.: Dielectric Loss Measurements, *Société Française des Electriciens,* vol. 1, no. 10, pp. 1105—1111, October, 1931.
Boella, M.: H. F. Measurement of Dielectric Loss, *Elettrotecnica,* vol. 19, p. 99, February, 1932.
Angelini, A. M.: Angle of Dielectric Loss in Insulators, *Elettrotecnica,* vol. 19, p. 261, April, 1932.
Bousman, H. W.: Bridge for Capacitance and Low Power Factor Measurements, *Gen. Elec. Rev.,* vol. 35, p. 295, May, 1932.
———: Dielectric Constant Measurement, *Electronics,* vol. 4, p. 264, August, 1932.
Chaffee, J. G.: The Determination of Dielectric Properties at Very High Frequencies, *Proc. IRE,* vol. 22, p. 1020, August, 1934.
Muller, E.: Power Factor at High Frequencies, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik,* vol. 43, p. 45, May, 1934.
Rohde, L.: Dielectric Loss Measurements at Ten Cycles, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik,* vol. 43, p. 156, May, 1934.
Hill, C. F.: Dielectric Breakdown, *Elec. J.,* vol. 31, p. 277, July, 1934.
Griffiths, W. H. F.: The Calibration of Small Variable Condensers at Radio Frequencies, *Wireless Engr.,* vol. 5, no. 59, p. 452, August, 1934.

Kessler, H.: H. F. Dielectric Measurements, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik,* vol. 45, p. 91, March, 1935.
Ronde, L.: Determination of Losses in Insulating Materials, *ASTM Standard of Electrical Insulation,* vol. 4, p. 59, May, 1935.
Deeley, P. M.: Electrolytic Capacitor Testing in Production, *Electronics,* vol. 8, p. 216, July, 1935.
Hummel, F.: Resonance Method of Determining Dielectric Constants, *Z. Tech. Phys.,* vol. 16, p. 264, 1935.
Rohde, L.: Dielectric Measurements at 60 cm, *Z. Tech. Phys.,* vol. 16, p. 637, 1935.
Hartshorn, L., and W. H. Ward: Effect of Electrodes in Measurement of Permittivity and Power Factor, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 75, p. 730, 1935.
Curtis, H. L.: «Electrical Measurements», McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1935.
Campbell, A., and E. C. Childs: «The Measurement of Inductance, Capacitance and Frequency», Macmillan and Co., Ltd., London, 1935.
Hartshorn, L., and W. H. Ward: The Measurement of Permittivity and Power Factor at Frequencies from 10^4 to 10^8 Cycles per Second, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 79, p. 597, 1936.
Field, R. F., and D. B. Sinclair: A Method for Determining the Residual Inductance and Resistance of a Variable Air Condenser at Radio Frequencies, *Proc. IRE,* vol. 24, p. 225, February, 1936.
Bull, R.: Theory and Application of Dielectric Constant Determination, *Z. ges. Kälte-Ind.,* vol. 45, p. 110, May—June, 1936.
Buckingham, W. B.: Measurement of Condenser Characteristics, *Electronics,* vol. 10, p. 13, June, 1937.
Boella, M.: Direct Method of Measuring Loss Conductance of Condensers at H. F., *Proc. IRE,* vol. 26, p. 421, April, 1938.
Leonard, S. C.: Measurement of Minute Changes of Capacitance and Inductance, *Electronics,* vol. 11, pp. 18—21, March, 1938.
———: Practical Methods of Testing Condensers, *Aerovox Research Worker,* February, March, April, and June, 1938.
Ford, L. H., and N F. Astbury: A Note on the Calibration of Decade Condensers, *J. Sci. Instr.,* vol. 15, p. 122, 1938.
Meacham, L. A.: A Bridge Stabilized Oscillator, *Proc. IRE,* vol. 26, p. 1278, 1938.
Neargoard, B. S.: A Survey of Ultra-High Frequency Measurements, *R. C. A. Rev.,* vol. 3, p. 156, October, 1938.
Astbury, N. F., and L. H. Ford: The Precision Measurement of Capacitance, *Proc. Phys. Soc. (London),* vol. 51, p. 37, 1939.
Chipman, R. A.: A Resonance Curve Method for the Absolute Measurement of Impedance at Frequences of the Order of 300 Mc/s, *J. Appl. Phys.,* vol. 10, p. 27, January, 1939.
Miller, J. M., and B. Salzberg: Measurements of Admittance at Ultra High Frequencies, *R. C. A. Rev.*, vol., 3, p. 480, April, 1939.
Kaufmann, H.: Impedance Measurement in Decimetre-Wave Circuits, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik,* vol. 53, p. 61, February, 1939.
Jones, T. I.: Mercury Electrodes for Measurements on Solid Dielectrics, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 74, p. 179, 1939.
Barrow, W. L., and W. W. Mieher: Natural Oscillations of Electrical Cavity Resonators, *Proc. IRE,* vol. 28, p. 184, 1940.

Hartshorn, L.: «R. F. Measurements by Bridge and Resonance Methods», Chapman and Hall, Ltd., London, 1940.
Sherwood, E. T.: Testing Ceramic Capacitors, *Electronics,* vol. 13, pp. 26—29, September, 1940.
Silva, H.: Measurements on Principle of Superposition in Solid Dielectrics, *Phys. Rev.*, vol. 60, p. 684, November, 1941.
Hague, B.: «Alternating Current Bridge Methods», Pitman, London, 1943.
Kusters, W.: On Measurements of Dielectric Properties of Ceramic Insulating Materials at Centimeter Wavelengths, *Wireless Eng.*, vol. 21, p. 13, January, 1944.
Amphlett, P. H.: The Measurement of Dielectric Constant, *J. Soc. Chem. Ind. (London),* p. 31, January, 1944.
Englund, C. R.: Dielectric Constants and Power Factors at Centimeter Wavelengths, *Bell System Tech. J.*, vol. 23, p. 114, January, 1944.
Englund, C. R.: Capacitor Impedance and Resistance Measurement, *Aerovox Research Worker,* vol. 16, p. 1, January, 1944.
Schlick, W.: Temperature Coefficient of Capacitance: Its Measurement in Small Radio Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 21, p. 65, February, 1944.
———: Production Tester for Mica Capacitors, *Electronics,* vol. 17, p. 156, August, 1944.
Hanopol, L. Y.: Production Tester for Small Values of Capacitance, *Electronics,* vol. 18, p. 160, September, 1945.
Turner, R. R.: Electrolytic Capacitor Checker, *Radio,* vol. 34, p. 38, October, 1945.
Horner, F., T. Taylor, R. Dunsmuir, J. Lamb, and W. Jackson: Resonance Methods of Dielectric Measurement at Centimeter Wavelengths, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 93, pt. III, p. 53, 1946.
Garton, C. G.: The Characteristics and Errors of Capacitors Used for Measurement Purposes, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 93, pt. II, p. 398, October, 1946.
Roberts, S., and A. Von Hippel: A New Method for Measuring Dielectric Constant and Loss in the Range of Centimeter Waves, *J. Appl. Phys.,* vol. 17, p. 610, July, 1946.
Field, R. F.: Connection Errors in Capacitance Measurements, *General Radio Experimenter,* vol. 21, pp. 1—4, May, 1947.
Shortcut, A.: Rapid Checker for Capacity-Continuity, *Radio Craft,* vol. 18, p. 37, July, 1947.
Works, C. N.: Resonant Cavities for Dielectric Measurements, *J. Appl. Phys.,* vol. 18, p. 605, 1947.
Reynolds, S. I.: Improved Re-entrant Cavity, *Gen Elec. Rev.,* vol. 50, p. 34, 1947.
Rayner, G. H., and L. H. Ford: The Calibration of Capacitors at the N. P. L. 1947, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 95, pt. II, p. 312, 1948.
Montgomery, C. G.: «Technique of Microwave Measurements», Rad. Lab. Series, vol. 11, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1947.
Dakin, T. W., and C. N. Works: Microwave Dielectric Measurement, *J. Appl. Phys.,* vol. 8, p. 789, 1947.
Daniel, V., A. C. Devonshire, and D. F. Rushman: Summary of Conference on Substance of High Permittivity (London, 1948), *J. Sci. Instr.,* vol. 26, p. 134, 1949.

Surber, W. H.: Universal Curves for Dielectric-Filled Waveguide and Microwave Dielectric Measurement Methods for Liquids and Solids, *J. Appl. Phys.*, vol. 19, p. 514, 1948.
Moreno, T.: «Mircowave Transmission Design Data», McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1948.
———: «Equipment to Measure the Temperature Coefficient of Capacity», Department of Commerce (Office of Technical Services), Pamphlet No. 97203, January, 1949.
Parmeter, R. L.: Two Capacitor Testers, *Radio-Electronics*, vol. 20, pp. 44—45, February, 1949.
Zeluff, V.: Infrared Checks Capacitor Leakage, *Electronics*, vol. 22, p. 159, April, 1949.
Bowdler, C. W.: A Three-Terminal Air Capacitor, *J. Sci. Instr.*, vol. 26, p. 117, April, 1949.
Melton, B. S.: Method of Measurement of the Internal Series Resistance of a Capacitor under Surge Conditions, *Proc. IRE*, vol. 37, pp. 690—693, June, 1949.
Schmitz: Simple Measuring Instrument for Electrolytic Capacitors (Ein Einfachs Gesetz zur Messung der Kapazität von Elektrolytkondenstoren), *Funk und Ton*, vol. 3, pp. 311—314, June, 1949.
Purper, C.: Production Test for Ceramic Capacitors, *Elec. Mfg.*, vol. 49, pp. 136—141, 310, 312, June, 1949.
Clay, J.: Accurate Determination of the Absolute Capacity of Condensers, *Physica*, vol. 15, pp. 484—488, July, 1949.
Sauer, H. A., and D. A. McLean: Direct Voltage Performance Test for Capacitor Paper, *Proc. IRE*, vol. 37, pp. 927—931, August, 1949.
Willman, W. R.: Capacitance Bridge, *Radio Service Dealer*, vol. 10, pp. 13—15, August, 1949.
———: Capacitance Measurement Bridge with Mechanical Rectifier and Mirror Galvanometer. Elimination of Harmonic Errors (Kapazität Gleichrichter und Spiegel Galvanometer. Ausschaltung der Fehler durch Oberwellen), *Frequenz*, vol. 3, pp. 259—264, September, 1949.
Soudels, I.: Capacitance Measurement with an A. C. Voltmeter, *Electronic Eng. (London)*, vol. 21, p. 416, November, 1949.
Gutmann, F.: A Direct Reading Instrument for the Measurement of the Series Resistance of Capacitors, *J. Sci. Instr.*, vol. 27, p. 169, June, 1950.
Tombs, D. M., and J. F. Ward: Measuring Small Changes in Capacitance by Frequency Modulation, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 97, pt. II, p. 645, October, 1950.
Mendousse, J. S., P. D. Goodman, and W. G. Cady: Capacitance Bridge (1—50 Mc/s), *Rev. Sci. Instr* vol. 21, p. 1002, December, 1950.
Barlow, H. M., and A. L. Cullen: «Principles of Guided Waves and Impedance Measurements» (Chapter on Dielectric Measurements), Constable & Co., Ltd., London, 1950.
Connor, J. A.: A Small Incremental Capacitor, *Electronics*, vol. 24, p. 250, October, 1951.
Parry, J. V. L.: The Measurement of Permittivity and Power Factor of Dielectrics at Frequencies from 300 to 600 Mc/s, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 98, pt. III, no. 54, p. 303, July, 1951.
Webb, J. K., and H. B. Wood: The Precise Measurement of Capacitance, *Inst. Elec. Engrs. (London)*, Monograph No. 100M, May, 1951.

Schreck, C.: Apparatus for the Measurement of the Temperature Coefficients of Inductors, Capacitors and Tuned Circuits, *Fernmeldetech. Z.*, vol. 4, p. 30, January, 1951.
Loverick, E.: Dielectric Measurements Using Pulsed Voltages, *J. Brit. Inst. Radio Engrs.*, vol. 11, p. 81, March, 1951.
Baker, E. B.: Automatic Measurement, Computation and Recording of Dielectric Constant and Loss Factor against Temperature, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 22, p. 376, Lune, 1951.
Voight, H.: A Measuring Bridge for 0.1 to 1,000 Mc/s, *Arch. Elektrotech.*, vol. 6, p. 414, 1952.
Terman, F. E., and J. M. Pettit: «Electronic Measurements», 2d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New. York, 1952.
Ruehlman, H. E.: Techniques for Measuring Capacitor Dielectric Absorption, *Tele-Tech and Electronic Industries*, vol. 14, pp. 72—74 plus, February, 1955.
———: A Convenient Test Fixture for Small Capacitors, *General Radio Experimenter*, October, 1955.
Peyssou, J., and J. Ladefroux: De la Mesure Industrielle du Coefficient de Temperature des Condensateurs a Dielectrique Ceramique, *Annales de Radioelectricite*, vol. 10, pp. 355—371, October, 1955.
Boer, J.: Bridge Tests Capacitor on Production Line, *Electronics*, vol. 29, pp. 146—147, August, 1956.
———: A 120 Cycle Source for Electrolytic Capacitor Testing with Capacitance Test Bridge, *General Radio Experimenter*, August, 1956.

4. Обзоры по конденсаторам постоянной емкости

Coursey, P. R.: «Electrical Condensers», Pitman, London, 1927.
Lewis, D.: Midget Condensers, *Radio*, vol. 12, p. 899, April, 1931.
Bouch, Z.: Oscillator Condenser Design for Single Control Superheterodynes, *Radio*, vol. 13, p. 132, August, 1931.
Houch, W. H.: Life Test for Condensers, *Electronics*, vol. 2, p. 114, September, 1931.
Sowerby, A. L. M.: Non-Inductive Condensers, *Wireless World*, vol. 31, p. 33, July, 1932.
———: Important Features in Design of High Voltage Transmitting Filter Condensers, *Aerovox Research Worker*, August, 1934.
Haskins, R. L.: Resonance Chart, Capacitor and Leads, *Electronics*, vol. 12, p. 35, August, 1939.
Hall, E. L., V. H. F. Behavior of Capacitors, *Electronics*, vol. 17, p. 114, March, 1944.
———: Glass Sealed Capacitors, *Electronic Eng. (London)*, vol. 17, p. 78, 1945.
Brotherton, M.: «Capacitors—Their Use in Electronic Circuits,» D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N. J., 1946.
———: «Electronic Engineering Patent Index» (F. A. Petraglia, Editor), Electronics Research Publishing Company, 1946.
Hopkins, R. J.: Overvoltage Testing of Capacitors, *Electronics*, vol. 20, pp. 105—107, June, 1947.
Stacy, J. D.: Significance of Watt-Second Ratings of Ratings of D-C Capacitors, *Communications*, vol. 27, pp. 24—25 and 41, August, 1947.
Wouch, V.: Energy Wasted Charging a Condenser, *Communications*, vol. 24, p. 48, April, 1948.

———: Standards of Very Small Capacitance, *Radio News,* vol. 3, p. 9, June, 1948.
Зингерман А. С., Статистический метод определения пробивного напряжения диэлектрика. «Журн. техн. физ.», т. 18, 1948, стр. 1029—1043.
Borgars, S. J.: German Radio Condensers, *Electronic Eng. (London),* vol. 20, pp. 355—357, November, 1948.
Dubilier, W.: Development, Design and Construction of Electrical Condensers, *J. Franklin Inst.,* vol. 248, pp. 193—204, September, 1949.
Coursey, P. R.: Hermetic Sealing of Capacitors, *Proc. Inst. Elec. Engrs (London),* vol. 97, pt. III, p. 56, January, 1950.
Jonker, J. L. H., and P. W. Haaijam: Wire Capacitor and Other Composite Drawn Products, *Philips Tech. Rev.,* vol. 13, pp. 145—151, December, 1951.
Davidson, R.: R. F. Characteristics of Capacitors, *Wireless World,* vol. 68, p. 301, August, 1952.
———: Bibliography on Power Capacitors (1925—1950), American Institute of Electrical Engineers, New York, 1952.
Podolsky, L., and J. K. Sprague: Some Characteristics and Limitations of Capacitor and Resistor Components, *IRE Trans. of Professional Group on Components Parts,* vol. PGCP-1, pp. 33—46, March, 1954.
Rockett, F.: Component Design Trends — Fixed Capacitors Undergo Miniaturization, *Electronics,* vol. 27, no.7, p. 120, July, 1954.
Geiser, D. T.: An Investigation of Lowest Resonant Frequency in Commercially Available By-Pass Capacitors, *Convention Record of the IRE,* pt. 3, p. 43, 1954.
Baumann, N. P., and G. C. Wiseman: Electrical Noise Pulses from Polarized Dielectrics, *J. Appl. Phys.,* vol. 25, no. 11, p. 1391, November, 1954.
Lee, D. B.: Evaluation of Capacitors, *Elec. Mfg.,* vol. 56, pp. 117—121, September, 1955.

5. Бумажные конденсаторы, диэлектрические свойства пропиточных масс и т. п.

Gerrant, A.: Dielectric Strength of Paper at High Pressure, *Arch. Elektrotech.,* vol. 25, p. 181, March, 1931.
Whitehead, J. B.: Dielectric Losses in Impregnated Paper, *Trans. AIEE,* vol. 52, p. 667, June, 1933.
Hartshorn, L., and W. H. Ward: Dielectric Properties of Paper, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 77, p. 723, November, 1935.
Linder, V. L., and J. Schneidermann: Behavior of Paper Condensers at High Frequencies, *Fernmeldetechnik Z.,* vol. 18, p. 73, May, 1937 (in German).
Katzman, J.: Life of Impregnated Paper Capacitors, *Electronics,* vol. 11, p. 54, June, 1938.
Pelmore, D. R.: Dielectric Loss in Paraffin-Wax Solutions, *Proc. Roy. Soc. (London),* vol. 172, p. 515, 1939.
Frolich, H.: Dielectric Losses in Paraffin-Wax Solutions, *Proc. Phys.* Soc., vol. 54, p. 422, 1942.
McLean, D. A.: Deterioration of Paper Condensers under High D. C. Voltage and High Temperature, *Bell Labs Record,* vol. 21, no. 6, p. 136, 1943.

Brinkmann, S.: Self Discharge and Time Constant of the High Voltage Oiled-Paper Condenser, *Wireless Eng.*, vol. 20, p. 449, September, 1943.
———: Paper Capacitor as Mica Capacitor Substitute, *Aerovox Research Worker*, vol. 14, p. 11, November, 1943.
Brotherton, M.: Paper Capacitors under Direct Voltages, *Proc. IRE*, vol 32, pp. 139—143, March, 1944.
Luterer, L.: Current and Potential Distribution in Shorted-Edge, Roll-Type Condensers (of Special Importance in Interference Suppression), *Wireless Eng.*, vol. 21, p. 89, February, 1944.
McLean, D. A., and L. Egerton: Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants; Stabilization by Anthraquinone, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 37, p. 73, January, 1945.
Whithead, J. B., and J. M. Kopper: Dielectric Strength and Life of Impregnated Paper Insulation, *Trans. AIEE*, vol. 64, April, 1945.
Berberich, L. J., and others: Characteristics of Chlorinated Impregnants in Direct-Current Paper Capacitors, *Proc. IRE*, vol. 33, p. 389, June, 1945.
Schweitzer, W. P.: Manufacture of Condenser Paper, *F. M.—Television*, vol. 6, pp. 37—39, February, 1946.
Weeks, J. R.: Capacitor Life Testing, *Bell Labs Record*, vol. 24, p. 296, August, 1946.
McLean, D. A., and L. Egerton: Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants: Mechanism of Stabilization, *Bell System Tech. J.*, vol. 25, pp. 652—653, October, 1946.
Sauer, H. A.: High Speed Life Test for Capacitor Paper, *Bell Labs Record*, vol. 25, pp. 17—19, January, 1947.
Cornell, J. I.: Metallized Paper Capacitors, *Communications*, vol. 27, p. 22, January, 1947.
Морозов И. И., Герметичные низковольтные бумажные конденсаторы, «Радиотехника», 1947, № 2, стр. 42.
Cornell, J.: Metallized Capacitor Data, *Electronics*, vol. 20, p. 174, March, 1947.
Godley, P., and J. C. Balsbaugh: Metallized Capacitor Tests, *Electronics*, vol. 20, p. 112, April, 1947.
McLean, D. A., and others: Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants: Effects of Sulphur, *Bell System Tech. J.*, vol. 26, p. 392, April, 1947.
McLean, D. A.: Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants: Benefits of Controlled Oxidation of Paper, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 39, pp. 1457—1461, November, 1947.
Brooks, H.: Probable Breakdown Voltage of Paper Dielectric Capacitors, *Trans. AIEE*, vol. 66, pp. 1137—1144, 1947.
Miller, H. F., and R. J. Hopkins: New Kraft Paper Capacitor, *Gen. Elec. Rev.*, vol. 50, pp. 20—24, December, 1947.
Cornell, J. I.: Metallized Capacitor Dielectrics, *Tele-Tech*, vol. 6, p. 98, January, 1948.
Dempter, B.: Characteristics of Some Oil-Impregnated Capacitors, *Electronics*, vol. 21, p. 168, May, 1948.
Farley, C. C.: Paper Capacitors Using Chlorinated Liquid Impregnants, *Proc. IRE (Australia)*, vol. 9, p. 13, July, 1948.
Wehe, H. G.: Metallizing Paper for Capacitors, *Bell Labs Record*, vol. 17, pp. 317—321, September, 1949.
———: Metallized Paper Capacitors, *Wireless World*, vol. 55, pp. 510—512, December, 1949.

Ренне В. Т., Применение полупроводящих жидкостей для пропитки бумажных конденсаторов, «Журн. техн. физ.», т. 19, 1949, стр. 218.
Ренне В. Т., Вычисление электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги (Новая теория пробоя, связанная со структурой бумаги), «Электричество», 1950, № 5, стр. 16—18.
Straeb, H.: The Metallized Paper Capacitor, *Elektrotech. Z.*, vol. 70, no. 9, p. 287, August, 1950.
McLean, D. A.: Metallized Paper for Capacitors, *Proc. IRE*, vol. 38, p. 1010, 1950.
Weeks, J. R.: Metallized Paper Capacitors, *Proc. IRE*, vol. 38, p. 1015, 1950.
Fisher, J. H.: Metallized Paper Capacitors, *Electronics*, vol. 23, p. 122, October, 1950.
———: Metallized Paper Capacitor, *Aerovox Research Worker*, June, July, August, 1951.
Church, H. F.: The Life of Impregnated Paper Capacitors with Special Reference to the Influence of Contaminants, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 98, pt. III, p. 56, 1951.
Eveson, R. K.: Low Voltage Self Healing Capacitors, *Bell Labs Record*, vol. 29, p. 56, 1951.
McLean, D. A., and H. A. Sauer: Stabilized Mineral Oil Capacitors, Annual Report of the 1951 Conference on Electrical Insulation, National Research Council, Washington, D. C.
Sauer, H. A., D. A. McLean, and L. Egerton: Stabilization of Dielectrics Operating under Direct Current, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, pp. 135—140, January, 1952.
———: High Temperature Metallized Paper Capacitors, *Aerovox Research Worker*, January—February, 1952.
Souder, W., and S. B. Newmann: Measurement of the Thickness of Capacitor Paper, *NBS Circular*, no. 532, 1952.
Church, H. F.: Stabilization of Impregnated Paper Capacitors, Pilot Scale Tests with Azobenzene, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 268, 1952.
Elsner, H.: Metallized Paper Capacitors, *Bull. Schweiz. Elektrotech. Ver.*, vol. 43E, p. 721, September, 1952.
Burnham, J.: Breakdown and Leakage Resistance Investigation of Metallized Paper Capacitors, *IRE Trans. of Prof. Group on Components Parts*, VPGCP-1, pp. 3—17, March, 1954.
Drvostep, J. J.: Impregnated Paper Capacitors, *Radio and Television News (Radio-Electronic Engineering)*, vol. 24, pp. 17—19, May, 1955.
Lee, D. B.: Evaluation of Capacitors (Paper «K» Characteristic), *Elec. Mfg.*, vol. 56, pp. 117—121, September, 1955.
Anderson, H. A.: Standards for Capacitor Paper, *Proc. Electronic Components Symposium*, May, 1956.
Callinan, T. D., and J. B. Romans: Fluorinated Liquid Dielectrics for Fixed Paper Capacitors, *Elec. Mfg.*, p. 146, May, 1957.

6. Слюдяные конденсаторы, электрические свойства слюды и т. п.

Dye, D. W., and L. Hartshorn: The Dielectric Properties of Mica, *Proc. Phys. Soc. (London)*, vol. 37, p. 42, 1924.
Jackson, W. W., and J. West: The Crystal Structure of Muscovite, *Z. Krist*, vol. 76, p. 211, 1930.

Brown, W. W.: Properties and Application of Mycalex to Radio Apparatus, *Proc. IRE*, vol. 18, pp. 1307—1315, August, 1930.

Donnat, C., and S. E. Goodall: Permittivity and Power Factors of Micas, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 69, p. 490, April, 1931.

Lewis, A. B., E. L. Hall, and F. R. Caldwell: Some Electrical Properties of Foreign and Domestic Micas and the Effect of Elevated Temperatures on Micas, *J. Research Nat. Bur. Standards*, vol 7., p. 409, August, 1931.

Maloff, I. G.: Mica Condensers in High-Frequency Circuits, *Proc. IRE*, vol. 20, p. 647, April, 1932.

Curtis, H. L., and others: Capacitance and Power Factor of a Mica Capacitor as Measured at the Bureau of Standards and the National Physics Laboratory, *J. Research Nat. Bur. Standards*, vol. 8, p. 507, April, 1932.

Jackson, W. W., and J. West: The Crystal Structure of Muscovite, *Z. Krist.*, vol. 85, p. 160, 1933.

Theissen, R. E.: Recent Developments in Mica Condensers, *General Radio Experimenter*, vol. 7, p. 1, January, 1933.

Schroeder, R.: Mica and Mica Products, *Elektrotech. Z.*, vol. 54, p. 541, June, 1933.

Brown, W. W.: Properties of Mycalex, *Proc. IRE*, vol. 21, p. 1939, September, 1933.

Sklar, L. B.: Padding Condenser, *Electronics*, vol. 10, p. 40, May, 1937.

Татаринов П. М., Слюды СССР, Москва—Ленинград, 1937.

Rushton, E., and L. Hartshorn: Power Losses in Mica, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 60, 1939.

Nicholls, F. B.: Alsifilm — a Mica Substitute, *Chem. Eng. Mining Rev.*, vol. 32, p. 438, 1940.

Hackett, W., and P. M. Thomas: Electric Strength of Mica and Its Variation with Temperature, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 88, pt. I, p. 295, August, 1941.

———: Power Factor in Indian Mica, *Electronic Ind.*, vol. 3, p. 121, March, 1944.

Green, A. P., and C. T. McComb: Resonance in Mica By-Pass Capacitors, *Electronics*, vol. 17, p. 219, March, 1944.

Thomas, A. M.: Defects in Mica Plates and Capacitors and the Use of Emergency Substitute Grades, *Electrical Research Association (London)*, Report D/T 30, 1944.

———: Absorption Measurements on Mica and Other Capacitors, *Electrical Research Association (London)*, Report D/T 31, 1944.

Austen, A. E. W.: The Dielectric Properties of Mica at High Electric Stress, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 92, pt. I, p. 373, 1945.

Coutlee, K. G.: Judging Mica Quality Electrically, *Trans. AIEE*, vol. 64, pp. 735—741, November, 1945.

Chapman, A. T.: Manufacture of Silvered Mica Capacitors: New Production Techniques Conserve Mica Stocks and Improve Quality of Finished Units, *Electronics*, vol. 18, pp. 146—149, November, 1945.

Garton, C. G.: The Characteristics and Errors of Capacitors Used for Measurement Purposes, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 93, pt. II, p. 398, October, 1946.

———: Synthetic Mica Developed in Germany, *Chem. Eng. News*, vol. N24, p. 3396, December, 1946.

Thomas, A. M.: The Elimination of Defective Mica Plates for Capacitors by Visual Inspection, *Electrical Research Association (London)*, Report D/T 34, 1946.
Christopher, A. J., and J. A. Rater: Mica Capacitors for Carrier Telephone Systems, *Bell System Tech. J.*, vol. 26, p. 213, January, 1947.
Schick, W.: Capacitance Stability of Ruby Muscovite Mica, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 94, pt. I, pp. 371—376, August, 1947.
Church, H. F.: Spontaneous Capacitance Fluctuations in Silvered Ceramic and Silvered Mica Capacitors, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 181, 1947.
Mahanti, P. C., and S. S. Mandal: Electrical Properties of Indian Mica: Effect of Pre-heating, *Indian J. Phys.*, vol. 22, pp. 7—13, January, 1948.
Middel, V. J.: Synthetic Mica — Report on the Process Developed in Germany by the Siemens Concern, *Electrical Research Association (London)*, Report D/T 40, 1948.
Green, A. P., and C. T. McComb: Resonance in Mica Capacitors, *Electronics*, vol. 17, p. 119, March, 1949.
Roberts, W. G.: Silvered Mica and Ceramic Capacitors, *Radio Times*, pt. 1, vol. 4, p. 11, June, 1949; pt. 2, vol. 4, p. 9, July, 1949; pt. 3, vol. 4, p. 9, August, 1949.
Tyler, P. B.: Synthetic Mica Research, U. S. Dept. of Commerce, 32545.
Griffeth, R. L., and E. R. Younglove: Manufacture and Processing of Mica Paper, Annual Report of the 1951 Conference on Electrical Insulation, National Research Council, Washington, D. C., 1951.
Rayner, G. H., and L. H. Ford: The Stability of Sub-miniature Mica Capacitors at the N. P. L., *J. Sci. Instr.*, vol. 28, p. 168, June, 1951.
Schmidt, P. S.: Mica Paper and Ceramic Capacitors, *Elec. Mfg.*, vol. 47, p. 244, 1951.
Rayner, G. H., and L. H. Ford: The Stability of Mica Standards of Capacitance, *J. Sci. Instr.*, vol. 28, no. 6, p. 168, June, 1951.
Javitz, A. E.: Research Progress in Dielectrics, 1951, *Elec. Mfg.*, vol. 49, p. 92 (Table I, specifically), January, 1952.
Bray, P. R.: Power Factor and Capacitance of Mica Capacitors at Low Frequencies, *J. Sci. Instr.*, vol. 30, pp. 49—51, February, 1953.
Lynch, A. C.: Variation of Capacitance with Temperature in Metallized Mica Capacitors, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 100, pt. IIA, no. 3, p. 38, 1953.
Rayner, G. H., and L. H. Ford: The Performance of Dried and Sealed Mica Capacitors, *J. Sci. Instr.*, vol. 31, no. 1, p. 3, January, 1954.
Dokuchitz, P., and T. Tognola: Elimination of Strategic Mica Films as Dielectric Materials for High Temperature Capacitors, *Proc. Electronic Components Conference*, 1958.

7. Керамические конденсаторы, электрические свойства керамики и т. п.

Schmidt, W.: Permittivity of Titania, *Ann. Physik*, vol. 4, p. 9, 1902.
Beldi, F.: Dielectric Losses and Breakdown Strength of Porcelain, *Brown Boveri Rev.*, vol. 18, p. 172, May, 1931.
Steger, W.: Advances in Ceramic Materials, *Z. Ver. Deut. Ing.*, vol. 77, p. 81, January, 1933.

Weicker, W.: Porcelain and Ceramic Insulating Materials, *Elektrotech. Z.*, vol. 54, p. 543, June, 1933.
Schönberg, E.: Insulating Materials of the Steatite Group, *Elektrotech. Z.*, vol. 54, p. 545, June, 1933.
Eucken, A., and A. Buchner: Permittivity of Titania, *Z. Physik. Chem.*, vol. 27, p. 326, 1934.
Soyck, W.: Dielectric Characteristics of Rutile Materials, *Verband Deutscher Elektrotechniken* (V. D. E. Fachbericht—Archive frur Elektrotechnik), p. 129, 1935.
Hartshorn, L., and W. H. Ward: Dielectric Properties of Frequentite, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 85, 1939.
Thurnauer, H.: Properties of Ceramic Materials, *Electronics*, vol. 12, p. 33, April, 1939.
Bellaschi, Z.: Dielectric Strength of Porcelain, *Trans. AIEE*, vol. 58, p. 651, December, 1939.
Richter, E. F.: On the A. C. Resistance of Ceramic Materials at Temperatures up to 600° C., *Phys. Z.*, vol. 40, p. 597, October, 1939.
———: Ceramic Materials, *Electrician (London)*, vol. 125, p. 137, September, 1940.
Berberich, L. J., and M. E. Bell: Dielectric Properties of the Rutile Form of TiO_2, *J. Appl. Phys.*, vol. 2, p. 681, 1940.
Robinson, W. G.: Ceramic Insulations for H. F. Work, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 87, p. 527, November, 1940.
Richter, E. F., and W. Weicker: Ceramic Insulating Materials at High Temperature, *Elektrotech. Z.*, vol. 64, p. 103, February, 1943.
Rosenthal, E.: Dielectric or Puncture Strength of Porcelain and Other Ceramic Materials, *Electronic Eng. (London)*, vol. 15, p. 408, March, 1943.
Rigterlink, M. D.: Ceramics for H. F. Insulation, *Bell Labs* Record, vol. 21, p. 290, May, 1943.
Maida, F. X.: Rating of Ceramic Condensers, *Electronic Ind.*, vol. 2, pp. 80—82, July, 1943.
Wainer, E.: High Titania Dielectrics, *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 83, p. 189, 1943.
Вул Б. М., Сканави Г. И., Высокочастотные керамические конденсаторы, Изв. АН СССР, физическая серия, 1, т. 8, 1944, № 4, стр. 194—199.
Russell, R.: Low Loss Ceramics, *Electronics*, vol. 17, p. 136, May, 1944.
Rigterlink, M. D.: Improved Ceramic Dielectric Materials, *Rev. Sci. Instr.*, vol. 12, p. 527, November, 1944.
Вул Б. М., Гольдман И. М., Диэлектрическая проницаемость титаната бария как функция напряженности переменного поля, Изв. АН СССР, т. 49, 1945, октябрь, стр. 177—180.
Vrolet, F., and R. Lecuir: Evolution of Ceramic Technique in the Laboratories of the Compagnie Generale de Télégraphie sans Fil (C. S. F.) for the Preparation of High Precision Ceramics, *Annales de Radioeléctricité*, vol. 1, pp. 152—159, October, 1945, and January, 1946.
Coursey, P. R., and K. G. Brand: Dielectric Constants of Some Titanates, *Nature*, vol. 157, pp. 297—298, March, 1946.
Frohlich, H.: Dielectric Properties of Dipolar Solids, *Proc. Roy. Soc. (London)*, vol. 185, p. 399, April, 1946.
Von Hippel, A., R. G. Breckenridge, F. G. Chasley, and Laszlo Tisza: High Dielectric Constant Ceramics, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 38, p. 1097, November, 1946.

De Brettersville, A.: Oscillograph Study of Dielectric Properties of Barium Titanate, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 29, p. 303, 1946.
———: High Dielectric Ceramic for Limited Space Capacitors: Research at the National Bureau of Standards, *Product Eng.*, vol. 18, pp. 147—148, June, 1947.
Howatt, G. N., R. G. Breckenridge, and J. M. Brownlow: Fabrication of Thin Ceramic Sheets for Capacitors, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 30, p. 237, August, 1947.
Thomas, A. M.: Experimental Low Temperature Coefficient Ceramics: Variation of Capacitance and Power Factor with Temperature, *Beama J. (London)*, vol. 54, p. 321, September, 1947.
Новосильцев Г. С., Кодаков А. Л., Диэлектрические свойства титаната бария при высоких частотах, «Журн. техн. физ.», т. 6, 1947, стр. 651—656.
Bonning, M.: Deposition of Thin Films of Titania, *J. Am. Optical Soc.*, vol. 37, p. 188, 1947.
———: High Dielectric Ceramics Produced with Tam Titanium Dioxide and Titanates, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 30, no. 8, p. 237, 1947.
Rosenthal, I. E.: Dielectric or Puncture Strength of Porcelain and Other Ceramic Materials, *Electronic Eng. (London)*, vol. 15, pp. 408—411, March, 1948.
Matthias, B., and A. Von Hippel: Domain Structure and Dielectric Response of Barium Titanate Single Crystals, *Phys. Rev.*, vol. 73, p. 1378, June, 1948.
Reddish, W.: Cyclic Variation of Capacitance, *Wireless Eng.*, vol. 25, p. 331, October, 1948.
Shelton, G. R., A. S. Creamer, and E. N. Bunting: Properties of Barium Magnesium Titanate Dielectrics, *J. Research Nat. Bur. Standards*, vol. 41, p. 17, 1948.
Blumenthal, W. B.: Preparation of Chemically Pure Anatase and Rutile, *Ceramic Age*, p. 320, June, 1948.
Powles, J. G.: Dielectric Properties of Titanates at Ultra High Frequencies, *Nature*, vol. 162, p. 614, 1948.
Marks, B. H.: Ceramic Dielectric Materials, *Electronics*, vol. 21, no. 8, p. 116, August, 1948.
Devonshire, A. F.: Structure and Dielectric Properties of Barium Titanate and Similar Compounds, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 185, 1948.
Powles, J. G.: Dielectric Properties of Mixed Barium and Strontium, Titanates at 10^{10} C/sec, *Nature*, vol. 162, p. 655, 1948.
Hartington, J. R., G. V. Planer, and I. I. Boswell: Voltage Effects in Titanate Polycrystals, *Nature*, vol. 162, p. 151, July, 1948.
Roberts, W. G.: Ceramic Capacitors, *J. Brit. IRE*, vol. 9, no. 5, p. 184, May, 1949.
Powles, J. G., and W. Jackson: The Measurement of the Dielectric Properties of High Permittivity Materials at Centimeter Wavelengths, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 96, pt. III, no. 43, p. 383, September, 1949.
Bauer, A. J.: Ceramic Transmitting Capacitors, *Electronics*, vol. 22, no. 3, p. 97, 1949.
Devonshire, A. F.: Theory of Barium Titanate — Part I, *Phil. Mag.*, vol. 40, p. 1040, October, 1949.
Verwey, E. J. W., and R. D. Bugel: Ceramic Materials with High Dielectric Constant, *Philips Tech. Rev.*, vol. 10, p. 231, February, 1949.

Kay, H. F., and P. Vousden: Symmetry Changes in Barium Titanate at Low Temperatures and Their Relation to Its Ferroelectric Properties, *Phil. Mag.*, vol. 40, p. 1019, October, 1949.
Blunt, R. F., and W. F. Love: Dielectric Properties of Barium Titanate at Low Temperatures, *Phys. Rev.*, vol. 76, pp. 1202—1204, October, 1949.
Jackson, W.: The Structure, Electrical Properties and Potential Applications of the Barium-Titanate Class of Ceramic Materials (also contains 75 references to work on barium-titanate ceramics), *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 97, pt. III, no. 49, p. 285, September, 1950.
Kiyoshi, A., and T. Testuro: Study on High Dielectric Constant Ceramics, *Bull. Inst. Chem. Research, Kyoto Univ.*, vol. 22, p. 79, 1950.
Devonshire, A. F.: Theory of Barium Titanate, *Phil. Mag.*, vol. 42, p. 1065, October, 1951.
Brownlow, J. M., and G. N. Howatt: Ceramic Capacitors in Circuit Miniaturization, *Tele-Tech,* vol. 10, pp. 56—57, October, 1951; vol. 11, pp. 56—57, November, 1951.
Graff, R. G.: Effect of Impurities on the Dielectric Properties of Barium Titanate, *Ceramic Age,* p. 16, December, 1951.
Shirane, G.: Dielectric Properties of Lead Zirconate, *Phys. Rev.*, vol. 84, p. 471, 1951.
Dranetz, A. Z.: Ceramics for Capacitors, *Tele-Vision (England)*, vol. 34, pp. 12—13, April, 1952.
Droughard, M. E., H. L. Funk, and D. Young: Dielectric Constant and Loss Measurement in $BaTiO_3$ Single Crystals while Traversing the Hysteresis Loops, *J. Appl. Phys.*, vol. 23, no. 9, p. 1166, September, 1952.
Popper, P.: Ceramic Dielectrics and Their Application to Capacitors for Use in Electronic Equipment, *Inst. Elec. Engrs. (London)*, Paper 1490, 1953.
Kramers, W. J.: Scientific Approach to New Ceramics (pts. I and II), *Research (London)*, p. 101, March, 1954, and p. 142, April, 1954.
Droughard, M. E., and D. Young: Domain Clamping Effect in Barium Titanate Single Crystals, *Phys. Rev.*, vol. 94, no. 6, p. 1561, June, 1954.
Slate, M. W.: Resonance Effects in Tubular Feed-Thru Capacitors, *Tele-Tech and Electronic Industries,* vol. 13, pp. 98—101, June, 1954.
Von Hippel, A., and Associates: «Tables of Dielectric Materials» (four volumes to date), Laboratory for Insulation Research, Massachusetts Institute of Technology, Boston.
Mertz, W. J.: Domain Formation and Domain Wall Motions in Ferroelectric $BaTio_3$ Single Crystals, *Phys. Rev.*, vol. 95, no. 3, p. 690, August, 1954.

8. Стеклянные и стеклоэмалевые конденсаторы, электрические свойства стекла и т. п.

Decker, W. C.: Power Losses in Commercial Glasses, *Elec. World,* vol. 89, p. 601, March, 1927.
Strutt, M. J. O.: Dielectric Properties of Various Glasses, *Arch. Elektrotech,* vol. 25, p. 715, October, 1931.

Богородицкий Н. П., Диэлектрические потери в стеклах, «Журн. техн. физ.», т. 2, 1935, № 4, стр. 324.
Morey, G. W.: Glass as a Dielectric, *J. Franklin Inst.*, vol. 219, p. 315, March, 1935.
Hackel, W. H. F.: Permittivity and Power Factor of Glasses, *Ann. Physik*, vol. 29, no. 1, p. 63, March, 1937.
Богородицкий Н. П., Фридберг И. Д., Диэлектрические потери в неорганических стеклах при радиочастотах, «Журн. техн. физ.», т. 4, 1937, № 9, стр. 707.
Hartshorn, L., and W. H. Ward: Dielectric Properties of Glass, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 93, 1939.
Humphrys, J. M., and W. R. Morgan: Effect of Composition and Thermal History on Dielectric Constants of Soda Borosilicate Glass, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 24, p. 123, 1941.
Сканави Г. И., Диэлектрические потери при высокой частоте в стеклоткани, «Физический журнал СССР» (на англ. яз.), т. 4, 1941, стр. 85.
Von Hippel, A., and R. J. Maurer: Pre-breakdown Currents in Glass *Phys. Rev.*, vol. 59, p. 820, 1941.
Guyer, E. M.: Electrical Glass, *Proc. IRE*, vol. 32, p. 743, December, 1944.
———: Glass Useful as an Insulating Medium in Electrical Condensers for Radio Circuits, *Glass Ind.*, vol. 27, p. 134, March, 1946.
Bradford, C. I., B. L. Weller, and S. A. McNeight: Printed Vitreous Enamel Components: Produced by Sprayed-Enamel Process, *Electronics*, vol. 20, p. 106, December, 1947.
Forrest, J. S.: Electrical Properties of Semiconducting Ceramic Glazes, *J. Sci. Instr.*, vol. 21, p. 211, 1947.
Danzin, A., and P. Meunier: Dielectric Properties of a Glass, *Compt. Rend.*, vol. 228, no. 5, p. 391,1949.
Stevels, J. M.: The Power Factor of Glasses, *Verres et Refractaires*, vol. 4, p. 83, 1950; ibid., p. 4, 1951.
———: The Dielectric Losses in Glasses, *J. Soc. Glass Technol.*, vol. 34, p. 80, 1950.
Callinan, T. D., R. T. Lucas, and R. C. Bowers: The Properties of Glass Fibre Paper, *Elec. Mfg.*, vol. 48, pp. 94—97, 1951.
Keller, K. J.: Dielectric Losses and Breakdown in Ceramic Materials — I: Electrical Conduction and Breakdown of Solid Insulators, in Particular Glass, *Koninklijk Instituut van Ingenieurs*, nos. 29—31, p. 485, May, 1951.
Stevels, J. M.: The Loss Angle of Glasses, *Koninklijk Instituut van Ingenieurs*, no. 31, p. 485, May, 1951.
Naudin, F.: The Effect of Thermal Treatment on the Dielectric Constant and Loss Angle of Glass, *Compt. Rend.*, vol. 232, p. 831, 1951.

9. Конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок, диэлектрические свойства и т. п.

Whitehead, J. B.: Dielectric Loss and Relaxation Time in Resins, *Physics*, vol. 2, p. 3, February, 1932.
Yager, W. A., Dielectric Constant and Loss of Plastics Related to Their Composition, *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 74, p. 113, 1938.
Hartshorn, L.: Plastics and Electrical Insulation, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 83, p. 474, October, 1938.

Hartshorn, L., and W. H. Ward: Dielectric Properties of Synthetic Resins, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 85, 1939.

Garton, C. G.: The Dielectric Properties of a Chemically Pure Resin, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 85, p. 625, 1939.

Pelmore, D. R.: Dielectric Loss in Simple Alkyd Resins, *Proc. Roy. Soc. (London)*, vol. 175, p. 468, July, 1940.

Hartshorn, L., E. Rushton, and N. J. L. Megson: The Dielectric Properties of Thermoplastic Synthetic Resins, *Proc. Phys. Soc. (London)*, vol. 52, p. 796, November, 1940.

Hartshorn, L.: Dielectric Properties of Some Thermoplastics, *Proc. Phys. Soc. (London)*, vol. 52, p. 796, November, 1940.

———: Molecular Relaxation and Properties of Plastics, *Proc. Phys. Soc. (London)*, vol. 52, p. 817, November, 1940.

Thomas, A. M., and M. V. Griffith: Intrinsic Electric Strength and Conductivity of Varnish Films and Their Variation with Temperature, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 89, pt. I, p. 487, 1942.

Yersley, F.: Electrical Properties of Neoprene, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 35, p. 330, March, 1943.

Garton, C. G., and Savic: Dipolar Properties of Resins, *Electrical Research Association (London)*, Report L/T 135, 1943.

Simonds, H. R., C. Ellis, and M. H. Bigelow: «Handbook of Plastics», Chapman & Hall, *Ltd.*, London, 1943.

Morrell, R. S., «Synthetic Resins and Allied Plastics», *Oxford University Press*, London, 1943.

Cares, A.: Perspex, *Endeavour*, vol. 3, p. 156, October, 1944.

Jackson, W., and J. S. A. Forsyth: The Development of Polythene as a High Frequency Dielectric, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 92, pt. III, p. 23, March, 1945.

Swallow, J. C.: Polythene, *Endeavour*, vol. 3, p. 26, January, 1946.

Weeks, J. R.: Polystyrene Capacitors: Construction and Performance, *Bell Labs Record*, vol. 24, p. 111, March, 1946.

———: Development of Polystyrene Capacitors, *Elec. Mfg.*, vol. 37, p. 146, 1946.

Nauth, R.: «The Chemistry and Technology of Plastics», *Reinhold Publishing Corporation*, New York, 1947.

Bown, C. E. H.: «Chemistry of High Polymers», Butterworth & Co. (Publishers) *Ltd.*, London, 1948.

Cozens, J. H.: Plastic Film Capacitors, *Wireless World*, vol. 55, p. 11, June, 1949.

Reddish, W.: The Dielectric Properties of Polyethylene Terephthalate, *Trans. Faraday Soc.*, vol. 46, no. 330, p. 459, June, 1950.

———: «The Plastics Encyclopaedia», Plastics Catalogue Corporation, New York (annually).

Sissman and Bopp: The Physical Properties of Irradiated Plastics, U. S. Atomic Energy Commission Report, ORNL-928, *Oak Ridge Nat. Lab.* (225 pages), June 29, 1951.

Matheson, L. A., and V. J. Caldecourt: Electrical Charge Storage in Polystyrene Capacitors, *J. Appl. Phys.*, vol. 22, p. 11, September, 1951.

Ball, I. D. L.: The Intrinsic Electric Strength of Polyvinyl Alcohol and Its Temperature Variation, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 98, pt. I, p. 84, March, 1951.

Wooley, M. C., G. T. Kohman, and W. McMahon: Polyethylene Terephthalate as a Capacitor Dielectric, *Electronic Eng. (London)*, vol. 71, p. 715, August, 1952.

———: Cross Linking of Polythene in the Atomic Pile, *British Plastics*, vol. 26, no. 286, p. 79, March, 1953.

Sun, K. H.: Effects of Atomic Radiation on High Polymers, *Modern Plastics*, vol. 32, p. 141, September, 1954 (contains extensive bibliography).

McLean, D. A., and H. G. Wehe: Miniature Lacquer Film Capacitors, *Proc. IRE*, vol. 42, pp. 1797—1805, December, 1954.

Ruby, J. A.: «Mylar» Film as Capacitor Dielectric, *Tele-Tech and Electronic Industries*, vol. 14, p. 72, April, 1955.

Mistic, G.: Capacitor Miniaturization with Plastic Films, *Aero Dig.*, vol. 70, p. 54, May, 1955.

———: Temperature Compensating Capacitors (Composite Plastic Films), *Elec. Mfg.*, vol. 57, pp. 83—86, February, 1956.

———: New Decade Capacitor with Polystyrene Dielectrics, *General Radio Experimenter*, July, 1956.

10. Электролитические конденсаторы

Smith, T. A., and J. Millen: Electrolytic Condensers, *Radio*, vol. 7, p. 808, December, 1925.

Siegmund, H. D.: The Aluminum Electrolytic Condenser, *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 53, p. 203, 1928.

Coursey, P. R.: Capacity of Dry Electrolytic Condensers, *Experimental Wireless and Wireless Engineering*, vol. 6, p. 128, March, 1929.

Edelman, P. E.: Dry Electrochemical Condensers, *Proc. IRE*, vol. 18, p. 1366, August, 1930.

Godsey, F. W.: Electrolytic Condensers for Radio Use. *Electronics*, vol. 2, p. 596, April, 1931.

———: A. C. Capacity of Electrolytic Condensers, *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 61, p. 515, April, 1932.

———: Film Characteristics of Electrolytic Condensers, *Trans. AIEE*, vol. 51, p. 432, June, 1932.

———: Power Losses in Electrolytic Condensers, *Trans. AIEE*, vol. 51, p. 439, June, 1932.

———: Electrolytic Condensers Produced in Aluminium by Impact Extrusion, *Iron Age*, vol. 130, p. 220, August, 1932.

———: Developments in the Design of Small Size Electrolytic Condensers, *Aerovox Research Worker*, November, 1933.

Covert, R. J.: The Dry Electrolytic Condenser, *Radio Eng.*, vol. 14, no. 6, p. 18, June, 1934.

Verwey, E. I. W.: The Structure of the Electrolytical Oxide Layer on Aluminium, *Z. anorg. Chem.*, vol. 91, p. 317, 1935.

———: Regulating Properties of Wet Electrolytic Condensers, *Aerovox Research Worker*, August, 1936.

Deeley, P. M.: «Electrolytic Capacitors», Cornell-Dubilier Corporation, *South Plainfield, N. J.*, 1938.

Coursey, P. R., and S. N. Ray: Electrolytic Condensers, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 85, p. 107, July, 1939.

Coursey, P. R.: «Electrolytic Condensers», Chapman & Hall, *Ltd.*, London, 1939.

Edwards, J. D., and F. Keller: Formation of Anodic Coatings on Aluminium, *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 79, p. 135, 1941.

Deeley. P. M.: Condensers at R. F., *Electronics,* vol. 16, p. 209, April 1943.
Georgiev, A. M.: «The Electrolytic Capacitor», Murray Hill Books, *Inc.,* New York, 1945.
———: Electrolytic Capacitors Dry Out (Elektrolytblokke torrer ud), *Radio Ekko,* vol. 1, p. 92, May, 1948.
Miguelis, H. E.: Climatisation of the Electrolytic Condenser, *Radio Technical Digest,* vol. 3, p. 77, April, 1949 (in French).
Whitehead, M.: New Electrolytic Capacitors — Use of Tantalum for Electrodes, *F. M. and Television,* vol. 11, p. 26, February, 1951.
Dummer, G. W. A.: Electrolytic Capacitors, *Wireless World,* vol. 57, p. 510, December, 1951.
Foster, L. W.: Tantalytic Capacitors, *Gen. Elec. Rev.,* vol. 54, p. 30, October, 1951 (revised February, 1953).
Easter, C. D.: Electrolytic Capacitors at Low Temperatures, *Tele-Tech,* vol. 11, pp. 44—45, January, 1952.
Maxwell, J. W.: New Low-Temperature Capacitors Electrolytic Types for Operation to —55° C, *Tele-Tech,* vol. 11, p. 53, June, 1952.
Muriset, G.: Influence of Impurities in Foil, Electrolyte and Paper in Electrolytic Capacitor, *Electrochem. Soc.,* vol. 99, pp. 285—288, July, 1952.
Foster, L. W.: Tantalum Foil Capacitors Save Space, *Electronics,* vol. 26, p. 242, May, 1953.
Nguyen, T. C., and J. Vergnolle: Condensateurs Electrolytiques au Tantale, *Annales de Radioélectricité,* vol. 935, pp. 83—97, January, 1954.
Young, L.: Anodic Oxide Films on Tantalum Electrodes, *Trans. Faraday Soc.,* vol. 50, February, 1954.
Altenpohl, D.: Improvements in the Field of Electrolytic Capacitors, *Convention Record IRE,* pt. 3, p. 35, 1954.
Hovey, R. J., and S. S. Fry: Tantalum Capacitors, *Elec. Mfg.,* vol. 57, pp. 80—81, March, 1956.
Peck, D. B., S. W. Bubriski, and W. W. Schroeder: High Temperature Foil Type Tantalum Capacitors, *Elec. Mfg.,* vol. 57, pp. 134—135, May, 1956.
McLean, D. A., and F. S. Power: Tantalum Solid Electrolytic Capacitors, *Proc. IRE,* vol. 44, pp. 872—878, July, 1956.
McLean, D. A.: Tantalum Capacitors Use Solid Electrolyte, *Electronics,* vol. 29, pp. 176—177, October, 1956.
Lunchick, A., and E. Gikow: Characteristics of Tantalum Electrolytic Capacitors, *Elec. Mfg.,* pp. 79—84, December, 1956.
Burnham, J.: Dielectric Films in Aluminium and Tantalum Electrolyte and Solid Tantalum Capacitors, *IRE Trans. on Component Parts,* vol. CP-4, pp. 73—82, September, 1957.
Fraioli, A. V.: Recent Advances in the Solid-State Electrolytic Capacitor, *IRE Trans. on Component Parts,* pp. 72—75, June, 1958.
Kass, S.: On Tantalum Capacitors, *Semiconductor Products,* p. 39, May—June, 1958.

11. Вакуумные, воздушные и газонаполненные конденсаторы

Rayner, E. H.: The Design and Use of an Air Condenser for High Voltages, *J. Sci. Instr.*, vol. 3, p. 33, November, 1925; p. 70, December, 1925; p. 104, January, 1926.

Astin, A. V.: Nature of Energy Losses in Air Capacitors at Low Frequencies, *J. Research Nat. Bur. Standards,* vol. 22, p. 673, 1939.
Michaelson. H. B.: Gas-Filled and Vacuum Capacitors, *Electronics,* vol. 17, no. 9, p. 124, September, 1944.
Floyd, G. H.: Vacuum Capacitors, *Proc. IRE*, vol. 32, p. 463, 1944.
Griffiths, H. A. H.: Vacuum Condensers, *Wireless World,* vol. 53, p. 23, January, 1947.
Moon, C., and C. M. Sparks: Standards for Low Values of Direct Capacitance, *J. Research Nat. Bur. Standards,* vol. 41, p. 497, November, 1948.
Ford, L. H.: Effect of Humidity on the Calibration of Precision Air Capacitors, *J. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 95, pt. II, pp. 709—712, December, 1948.
Borgars, S. J.: Development of Vacuum Capacitors, *Proc. Inst. Elec.* Engrs. *(London),* vol. 99, pt. III, no. 61, p. 307, September, 1952.
Clothier, W. K.: A Fixed Gas-Dielectric Capacitor of High Stability, *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London),* vol. 101, pt. II, p. 453, August, 1954.

12. Обзоры общего характера по переменным конденсаторам

Cheireix, H.: Variable Condensers with Plates of Special Form, *Lumiére électr.,* vol. 31, p. 73, 1915.
Winters, S. R.: Straight Line Condensers, *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol. 12, p. 24, April, 1925.
Forbes, H. C.: A Straight-Line Frequency Variable Condenser, *Proc. IRE,* vol. 13, p. 507, August, 1925.
Harris, S.: Straight-Line Frequency Condensers, *Radio,* vol. N7, p. 188, August—September, 1925.
Roos, O. C.: Simplified S. L. F. and S. L W. Design, *Proc. IRE,* vol. 14, p. 773, December, 1926; Discussion by O. C. Roos, W. R.Batcher and P. M. Mueller in vol. 15, p. 319, April, 1927.
Griffiths, W. H. F.: Accuracy and Calibration Permanence of Variable Air Condensers for Precision Wave-meters, *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol 5, p. 17, January, 1928.
Edgeworth, K. E.: What is the Correct Characteristic for a Variable Condenser? *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol. 5, p. 148, March, 1928.
Crawford, J. D.: Straight-Line Wavelength and Frequency Variable Condensers, *General Radio Experimenter,* vol. 4, no. 10, p. 1, March, 1930.
Griffiths, W. H. F.: Losses in Variable Air Condensers, *Experimental Wireless and Wireless Engineering,* vol. 8, p. 124, March, 1931.
Koepping, E. D.: Gang Condensers of Variable Capacity, *Radio Eng.,* vol. 12, no. 9, p. 7, September, 1932.
McNamiee, B. F.: Padding Condensers, *Electronics,* vol. 4, p. 160, May, 1932.
Schwartzmann, H., and L. G. Burnell: Supperhet Tuning Condenser Design, *Electronics,* vol. 7, p. 180, June, 1934.
Jackson, W.: Analysis of Air Condensers Loss Resistance, *Proc. IRE,* vol. 22, p. 957, August, 1934.
Field, R. F., and D. B. Sinclair: Method for Determining the Residual Inductance and Resistance of a Variable Air Condenser at Radio Frequencies, *Proc. IRE,* vol. 21, p. 255, February, 1936.

Ward, W. H.: Self-Inductance of Variable Air Capacitors, *J. Sci. Instr.*, vol. 13, p. 251, August, 1936.
Proctor, R. F.: Variable Air Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 17, p. 257, June, 1940.
———: Straight-Line Rotating Plate Condensers with Large Angle of Rotation, *Electronic Eng. (London)*, vol. 15, pp. 434—435, March, 1943.
Wald, S.: Liquid Dielectrics for Variable Condensers, *Electronic Eng. (London)*, vol. 10, p. 7, April, 1948.
Kline, H. W.: Increasing the Self-Resonant Frequency of Variable Capacitors, *Radio News*, vol. 40, p. 13, July, 1948.
Wald, S.: Oil-Filled Miniature Tuning Capacitor, *Tele-Tech*, vol. 7, pp. 43—45, October, 1948.
Bowdler, G. W.: Wide-Range Variable Capacitor, *J. Sci. Instr.*, vol. 26, p. 117, April, 1949.
———: Easy Calculation of Variable Condensers (Fácil Cálculo de los Condensadores Variables), *Boletín Técnico de Fidelco*, pp. 16—17, April, 1949.
Pender, H., and K. McIlwain: «Electrical Engineers Handbook (Communications and Electronics Volume)», John Wiley & Sons, *Inc.*, New York, 1949.
Henney, K.: «Radio Engineering Handbook», McGraw-Hill Book Company, *Inc.*, New York, 1950.
Schweikert, G. G.: Construction and Calculation of Variable Capacitors, *Elektrotechnik (Berlin)*, vol. 5, p. 226, May, 1951.
Briganti, E.: Study and Evaluation of the Microphony due to Vibrations of the Plates of a Variable Condenser, *Telecommunicazioni*, vol. 21, p. 363, August, 1953.
Rockett, F.: Component Design Trends — New Variable Capacitors Extend Tuning Range, *Electronics*, vol. 27, p. 130, August, 1954.
Wilson, H. M.: Air Capacitor, Type 1420 Variable, *General Radio Experimenter*, July, 1956.

13. Прецизионные переменные конденсаторы

Griffiths, W. H. F.: Calibration Permanence and Overall Accuracy of the Series-Gap Precision Variable Air Condenser, *Experimental Wireless and Wireless Engineering*, vol. 6, p. 23, January—February, 1929.
Kouenhowen, W. B., and C. L. Lemmon: Phase-Defect Angle of an Air Capacitor, *J. Am. Inst. Elec. Engrs. (JAIEE)*, vol. 49, p. 945, November, 1930.
Griffiths, W. H. F.: The Losses in Variable Air Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 8, p. 124, 1931.
Thomas, H. A.: The Electrical Stability of Condensers, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 81, p. 227, 1936.
Griffiths, W. H. F.: The Temperature Compensation of Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 19, p. 148, April, 1942.
Garton, G. C.: A Variable Air Capacitor of Zero Loss Angle, *Technique (Muirhead)*, vol. 2, no. 4, 1948.
Ford, L. H.: The Effect of Humidity on the Calibration of Precision Air Capacitors, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 96, pt. III, p. 13, January, 1949.

14. Законы изменения емкости с углом поворота оси ротора

Duddell, W.: On a Variable Condenser with a Square Law, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 52, p. 275, 1914.

Forbes, H. C.: The Straight-Line Frequency Variable Condenser, *Proc. IRE*, vol. 13, p. 507, 1925.

Griffiths, W. H. F.: Notes on the Laws of Variable Air Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 3, p. 3, January, 1926.

———: Further Notes on the Laws of Variable Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 3, p. 743, December, 1926.

———: Wide-Range Variable Condenser for Special Laws, *Wireless Eng.*, vol. 11, p. 415, August, 1934.

———: Law Linearity of Semi-Circular Plate Variable Air Condensers, *Wireless Eng.*, vol. 22, p. 107, March, 1945.

McDonald, L. J.: Contours of Capacitor Rotor Plates, *Electronics*, vol. 18, p. 126, March, 1945.

Conner, J. A.: R. F. Standard Capacitors for Minute Increments (Co-Axial Types), *Electronics*, vol. 24, p. 250, October, 1951.

Schmid, O.: Calculating the Profile of Variable Capacitors, *Frequenz*, vol. 6, p. 105, April, 1952.

15. Переменные конденсаторы для радиопередатчиков и связанные с ними вопросы

Reuhema, L. E.: The Relation between Frequency and Sparkover Voltage in a Sphere-Gap Voltmeter, *Trans. AIEE*, vol. 47, p. 38, January, 1928.

Miseré, F.: Breakdown of Air over a Frequency Range 200 to 1,000 Kc/s, *Arch. Electrotech*, vol. 26, p. 123, 1932.

Seward, E. W.: The Breakdown Strength of Air, *Electrician (London)*, vol. 117, p. 783, 1936.

Seward, E. W.: The Electric Strength of Air at High Frequencies, *J. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 84, p. 288, February, 1939.

Ekstrand, P. A.: Radio-Frequency Sparkover in Air, *Proc. IRE*, vol. 28, p. 262, June, 1940.

Varela, A. A.: Effect of D. C. Potential on Initiation of R. F. Discharge, *Phys. Rev.*, vol. 71, p. 124, 1947.

Pim, J. A.: Electrical Breakdown Strength of Air at Ultra-High Frequencies, *Nature*, vol. 161, p. 683, May, 1948.

———: The Electrical Breakdown Strenght of Air at Ultra-High Frequencies (curves for 100 to 300 Mc/s), *Proc. Inst. Elec. Engrs. (London)*, vol. 97, pt. III, p. 117, March, 1949.

Wheeler, H. A.: Air Breakdown Chart for Radar Pulses, *Electronics*, vol. 25, p. 148, August, 1952.

16. Разное по вопросу о переменной емкости

Gordon, J. F.: Electrically Variable Gas Dielectric Capacitor, *Electronics*, vol. 29, p. 158, January, 1956.

Дж. В. А. Дэммер
и Г. М. Норденберг
КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ
И ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ
М.-Л., Госэнергоиздат, 1963, 315 стр.
с рис. 621.319.4

Редактор *Д. М. Казарновский*
Технический редактор
Е. М. Соболева

Сдано в производство 27/III 1963 г. Подписано к печати 18/VI 1963 г. Печ. л. 16,19. Уч.-изд. 16.5. Бум. л. 4,94. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Тираж 11 000. Цена 1 р. 31 к. Заказ 294.

Ленинградский Совет народного хозяйства. Управление целлюлозно-бумажной и полиграфической промышленности. Типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горького. Ленинград, Гатчинская, 26.